

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. М.В. ЛОМОНОСОВА (МГУ)

ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Отчет зимней экспедиции НСО
кафедры метеорологии и климатологии

**Оценка характеристик теплообмена подстилающей
поверхности с атмосферой в высоких широтах
(на примере побережья Белого моря).**



Руководитель экспедиции: н.с. Константинов П.И.

Соруководитель: н.с. Степаненко В.М.

Участники экспедиции: Бычкова В.И. (5 курс), Барабанова О.В. (5 курс), Железнова И.В. (5 курс), Мельник К.О. (4 курс), Будаев М.Е. (3 курс), Капустина М.М. (3 курс), Дебольский А.В. (2 курс), Никитина Н.Г. (2 курс), Архангельская А.А. (2 курс)

Москва 2010

Содержание

Введение (<i>Капустина М.М.</i>).....	3
Глава 1. Синоптические процессы в период экспедиции (<i>Будаев М.Е.</i>).....	5
Глава 2. Микроклиматические различия и временной ход основных метеорологических величин (<i>Железнова И.В.</i>).....	7
Глава 3. Моделирование турбулентной конвекции над полярной вихреразрешающей модели (<i>Дебольский А.В.</i>).....	12
Глава 4. Поток тепла над акваторией (<i>Мельник К.О.</i>).....	14
Глава 5. Пространственное распределение снежного покрова и его теплообмен с атмосферой (<i>Архангельская А.А., Барабанова О.В., Никитина Н.Г.</i>).....	17
Глава 6. Моделирование мезомасштабной циркуляции над Белым морем (<i>Бычкова В.И.</i>).....	25
Заключение (<i>Капустина М.М.</i>).....	29
Благодарности	30
Список литературы	30

Введение

В 2010 г. местом проведения экспедиции Научного студенческого общества (НСО) кафедры метеорологии и климатологии Географического факультета МГУ в период с 26 января по 6 февраля был избран полуостров Киндо, расположенный в северо-западной части акватории Белого моря (республика Карелия, Беломорская биологическая станция МГУ). В состав экспедиции под руководством н.с. П.И. Константинова вошли девять студентов, два аспиранта и один научный сотрудник кафедры метеорологии и климатологии.

Исследование арктических регионов на данном этапе представляет собой активно развивающееся направление современной географии. Об этом можно судить по результатам исследований, проведенных в рамках Международного полярного года, которые показали, что потепление климата в Арктике продолжается. Произошли изменения в скорости таяния арктического льда, нарушение и уменьшение ледового покрова, а, следовательно, увеличение количества полыней и снежниц в акватории Северного ледовитого океана. Таким образом, актуальность исследования северных регионов и составления для них климатических прогнозов не вызывает сомнений.

Это обусловило цель экспедиции: произвести оценку характеристик теплообмена подстилающей поверхности с атмосферой в высоких широтах в условиях формирования мощного снежного покрова на суше и неоднородного ледового покрова в прилегающей акватории (учесть влияние полыней).

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- оценить энергетическое влияние полыни в проливе Великая Салма на прилегающие территории
- изучить теплообмен подстилающей поверхности с атмосферой при мощном снежном покрове.
- выявить закономерности распределения снежного покрова на п-ове Киндо в зависимости от растительности и рельефа территории

Научная новизна данного исследования состоит в следующем:

- впервые микроклиматические исследования на полуострове Киндо были проведены в зимний период.
- для обеспечения круглосуточной работы автоматических метеорологических станций при низких температурах впервые была применена технология обогрева микрокомпьютеров, с помощью сохраняющих тепло контейнеров;
- впервые для исследования теплового влияния полыни и интерпретации данных наблюдений была применена вихреразрешающая математическая модель пограничного слоя, разработанная в Институте вычислительной математики РАН;
- впервые были оценены величины потоков тепла с подстилающей поверхности суши и акватории в атмосферу с учетом наличия полыней, распределения залесенных и открытых участков, неоднородности высоты снежного покрова;

Практическое значение данной работы заключается в том, что акватория пролива Великая Салма является типичной для данных широт в зимний период. Полученные результаты можно применить к аналогичным акваториям и использовать для улучшения прогноза погоды и климата. Кроме того, благодаря произведенным исследованиям, будет возможно рассчитать потоки явного и скрытого тепла, получить которые с помощью полевых измерений, из-за сложности и трудоемкости задачи, с должной точностью не представляется возможным. Эти результаты, в свою очередь, дадут более точное представление о

теплофизических параметрах ландшафта, что позволит оценить отепляющий эффект польньи и улучшить качество прогноза метеорологических полей в данном регионе.

Для решения этих задач в полевых условиях были выполнены следующие виды работ:

- В период подготовки к экспедиции была проведена проверка трех автоматических метеостанций (АМС) и напочвенных термометров (максимальных, минимальных, срочных) в Метеорологической обсерватории МГУ. Для АМС были вычислены поправки, которые были учтены при обработке данных, полученных в ходе экспедиции;
- С 28.01 по 4.02 2010 г. были произведены микроклиматические наблюдения, для которых использовались АМС Davis Vantage Pro 2, осуществляющие запись всех основных метеорологических параметров в автоматическом режиме с дискретностью 5 минут. Они были расположены на разном удалении от польньи для оценки ее отепляющего эффекта;
- Были проведены измерения температуры поверхности снега напочвенными термометрами на мысу пролива Великая Салма с дискретностью в 3 часа, и на вершине горы Ругозерской, а также суточной амплитуды температуры поверхности снега еще в 4-х точках полигона;
- Были проведены снегомерные работы по 4-м маршрутам, в ходе которых измерялась высота и плотность снега. Высоту снега измеряли значительно чаще, чем плотность во время передвижения по маршруту, для получения более длинных выборок для построения статистического распределения;
- В течение экспедиции дежурные представляли анализ синоптической ситуации и давали прогноз, необходимый при планировании работ и снегомерных маршрутов.

Затем, в камеральных условиях полученные данные о микроклимате и распределении снежного покрова были подвергнуты статистической обработке, а также использованы в качестве начальных и граничных условий и данных для валидации при гидродинамическом моделировании процессов теплообмена между подстилающей поверхностью и атмосферой.

Для этого были использованы следующие физико-математические модели:

- вихреразрешающая математическая модель пограничного слоя ИВМ РАН;
- одномерная гидротермодинамическая модель LAKE НИВЦ МГУ;
- модель деятельного слоя суши ИВМ РАН;
- прогностическая региональная модель WRF (модель Национального Центра Атмосферных Исследований – США).

Структура отчета в целом совпадает с порядком выполненных работ. Отчет можно разделить на три части:

Первая часть освещает «погодный фон» проведенных исследований и включает в себя анализ преобладающих в течение экспедиции синоптических ситуаций(глава 1).

Во второй части описаны результаты микроклиматических наблюдений на полигоне и снегомерной съемки. (глава 2 и глава 5, часть 1 соответственно).

В третьей части отчета приведены результаты расчета по четырем различным моделям. Так, в главе 3 с помощью вихреразрешающей модели была воссоздана циркуляция в прибрежной зоне и рассмотрено, что происходит с тепловым следом польньи в различных ситуациях. В главах 4 и 5 с помощью одномерной гидротермодинамической модели LAKE и модели деятельного слоя суши Института вычислительной математики (ИВМ) РАН (модель Е.Е. Мачульской) были рассчитаны потоки явного и скрытого тепла над акваторией и над сушей. Поскольку входными данными для модели деятельного слоя суши ИВМ РАН

является высота и плотность снежного покрова, то их пространственное распределение и другие характеристики также рассматриваются в главе 5.

Глава 6 посвящена описанию численных экспериментов и описанию полученных результатов с прогностической региональной моделью WRF.

Глава 1. Синоптические процессы в период экспедиции.

Как известно, характер синоптических процессов над территорией формирует ее погодные условия и являются одним из важнейших факторов, определяющих тепловой и радиационный баланс поверхности. Соответственно, типизация синоптических процессов, наблюдавшихся в период экспедиции, играет важную роль при анализе микроклимата района, характеристик снежного покрова и исследовании теплового влияния полыньи на территорию. Стоит отметить, что микроклиматические характеристики, и летом и зимой, проявляются сильнее всего в антициклональных условиях при низких скоростях ветра и штиле, тогда как в циклонических условиях возникает активное перемешивание, при котором микроклиматические различия в температуре воздуха нивелируются. Если говорить о тепловом эффекте полыньи, то одним из наиболее важных параметров, его определяющих, является направление ветра, зависящее в значительной степени как от характера крупномасштабной циркуляции, так и от местных условий – рельефа и ориентации береговой линии.

В результате анализа приземных и высотных синоптических карт Европейской территории России за данный период (предоставленных Гидрометцентром РФ), и временного хода основных метеовеличин, полученных с помощью автоматической метеорологической станции (АМС) (Рис 1.1), установленной участниками экспедиции на мысе Крестовом, а также АМС кафедры океанологии, расположенной на пирсе ББС, были выделены три синоптических периода, характеризовавшихся различными погодными условиями в исследуемом районе.

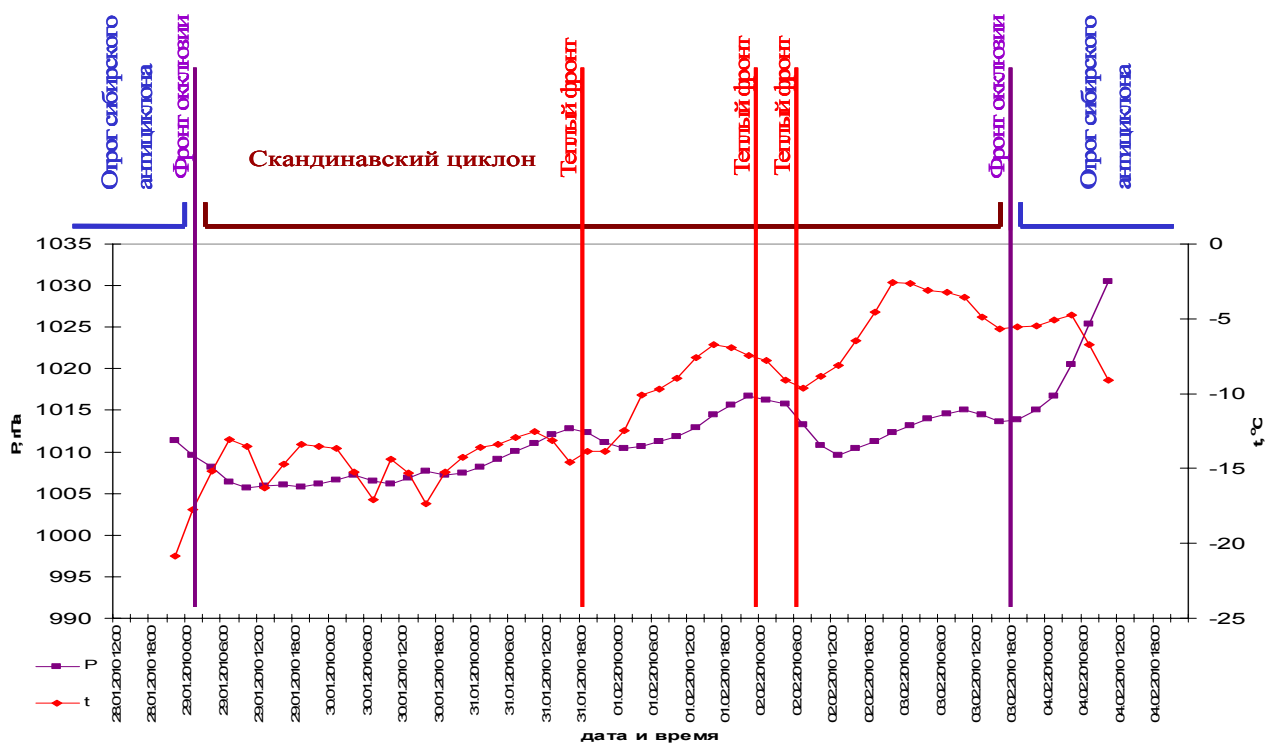


Рис. 1.1. Ход осредненных за каждые три часа давления и температуры за период экспедиции.

В первый период, продолжавшийся с 26 по 28 января, территория ББС находилась под влиянием северо-западного отрога Сибирского антициклона, при этом над Скандинавией располагался крупный циклон, в ложбине которого 28 января образовалась новая депрессия с центром над западной акваторией Балтийского моря. В течение дня 28 января происходила постепенная смена циркуляции: влияние гребня Сибирского антициклона ослабло и произошло усиление скандинавского циклона, и перенос воздушных масс изменился с субширотного на субмеридиональный, что ознаменовало собой наступление следующего синоптического периода, продлившегося до вечера 3 февраля. Это проявилось в прохождении фронта окклюзии с осадками в виде снега в ночь с 28 на 29 января.

29 и 30 января температура и давление практически не менялись, полуостров Киндо находился под влиянием постоянно усиливавшегося скандинавского циклона, который к тому моменту значительно «углубился» и расширился, превратившись в многоцентровую депрессию, которая заняла собою территорию всей Европы. 31 января многоцентровая депрессия над Европой еще больше увеличилась, происходила циркуляция ее отдельных центров против часовой стрелки. Теплый фронт одного из этих циклонов прошел через территорию ББС, что хорошо выражено в ходе давления на станции. Из его облачной системы произошло выпадение обильных осадков в виде снега. Таким образом, происходил ярко выраженный вынос тепла с юга.

1-2 февраля циклоническая деятельность на западе Европы ослабла, однако к северу сместился южный средиземноморский циклон, который, пройдя над территорией западной Украины, принес тепло в центральные регионы ЕТР и достиг Скандинавии. При этом произошла регенерация и развитие старого циклона, располагавшегося над восточной акваторией Балтийского моря. В течение первой половины дня 2 февраля его теплые фронты достигли полуострова Киндо (рис. 1.2.), что хорошо соотносится с ходом давления на ББС, и принесли осадки в виде снега, а температура достигла своего максимума за период экспедиции – $-2,3^{\circ}\text{C}$.

В течение второй половины дня 2-го и первой половины 3 февраля территория ББС располагалась в теплом секторе циклона, постепенно смещавшегося с Балтийского моря на северо-запад Скандинавского полуострова. В тоже время севера Европы достиг очередной южный циклон, сформировавшийся над Черным морем, который к тому времени уже заполнился и был выражен лишь в ложбине скандинавского циклона. Фронт окклюзии этой ложбины, прошедший над полуостровом Киндо, дал осадки в виде снега.

Второй синоптический период являлся наиболее продолжительным за время экспедиции. В течение него территория полуострова Киндо располагалась в передней части крупной барической депрессии, происходил вынос тепла южными циклонами. В целом в течение второго синоптического периода температура преимущественно росла, и погода характеризовалась сплошной облачностью, периодическим усилением ветра и частыми фронтальными осадками. Основные полевые работы в экспедиции проходили именно в этот период (в силу его наибольшей продолжительности), что существенно повлияло на полученные данные, так как при циклоническом характере погодных условий (о чём уже упоминалось выше) микроклиматические различия проявляются слабее всего.

Третий синоптический период начался во второй половине дня 3 февраля. После прохождения фронта окклюзии циклон, располагавшийся над северо-западной частью Скандинавии, сместился еще дальше на запад к Атлантическому океану, а район ББС оказался под влиянием активизировавшегося на юго-востоке Сибирского антициклона. В течение дня 4 февраля антициклон усилился, что характеризовалось значительным ростом давления на ББС (до 5 гПа за 3 часа). Температура начала падать, ветер усилился, а облачность несколько уменьшилась.

Таким образом, за время экспедиции было выделено три синоптических периода, которые соответствовали двум типам атмосферной циркуляции. Это влияние северо-западной периферии сибирского антициклона (первый и третий периоды), проявившееся в

повышенном фоне давления, относительно холодной и ясной погоде, и нахождение полуострова Киндо в передней части скандинавского циклона (второй период), в течение которого происходил вынос тепла с юга, значительная облачность и периодическое выпадение фронтальных осадков.

Рассматривая вопрос о тепловом воздействии полярной пустыни на территорию, следует учитывать, что при разных синоптических условиях оно будет различным. Исходя из взаимного расположения полуострова и полярной пустыни, можно утверждать, что наибольший отепляющий эффект должен возникать при северных и северо-восточных ветрах. В период экспедиции в северной части ЕТР преобладало южное направление фонового потока, что выразилось в южных и юго-восточных ветрах на ББС, при которых отепляющее влияние полярной пустыни на территорию полуострова Киндо было выражено слабо.

Если говорить о тех синоптических ситуациях, которые теоретически в наибольшей степени способствуют сильному отепляющему воздействию полярной пустыни на территорию полуострова Киндо, то следует выделить два характерных случая: при нахождении территории ББС в тылу прошедшего с севера циклона, и при смещении с севера антициклона или гребня и его стационарирования над районом соответствующим образом. Подобных синоптических ситуаций за период экспедиции не наблюдалось, поэтому отепляющее влияние полярной пустыни практически не было выражено.

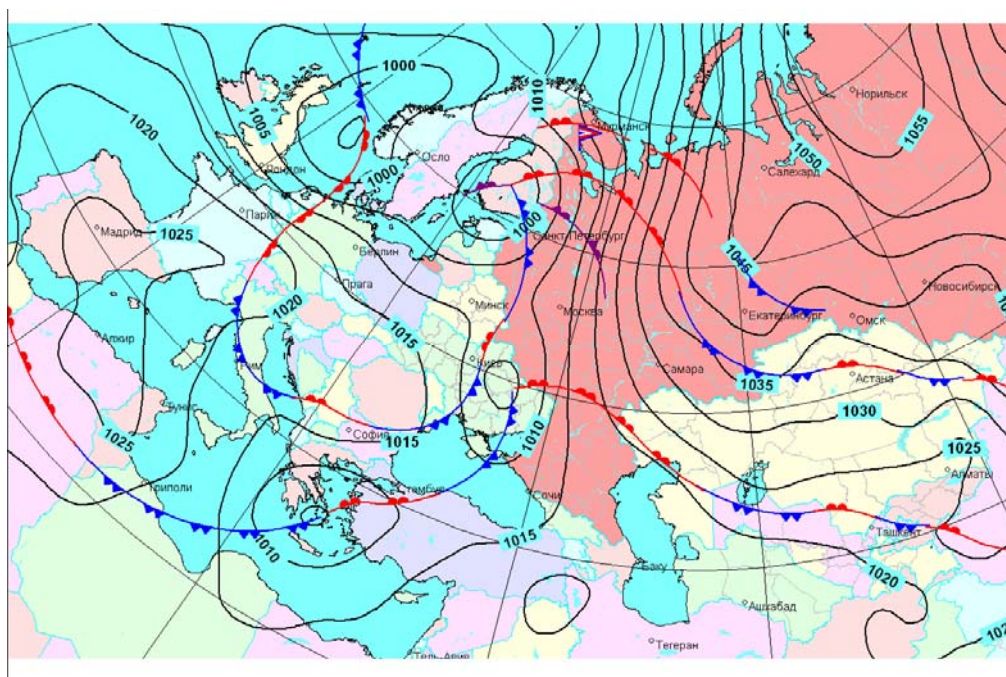


Рис. 1.2. Приземная синоптическая карта за 02.02.2010, 06 ч СГВ.

Глава 2.

Микроклиматические различия и временной ход основных метеорологических величин

Микроклиматические наблюдения в течение экспедиции проводились в период с 28.01 по 4.02.2010 г. Для наблюдений использовались автоматические метеорологические станции (АМС) Davis Vantage Pro 2, осуществляющие запись всех основных метеорологических параметров в автоматическом режиме с дискретностью 5 минут. На территории полигона

было установлено три микроклиматические точки: на территории базы на мысу пролива Великая Салма – станция «база»; на вершине горы Ругозерской («Радикулит») – станция «холм», и на льду вблизи берега Кислой губы - станция «губа» (рис.3.1). Особенностью используемых АМС является невозможность записи данных при отрицательных температурах, поэтому нами были использованы сохраняющие тепло контейнеры и обогревательные элементы, которые необходимо было ежедневно заменять для поддержания работы станций. Подобные измерения впервые проводились в условиях значительных отрицательных температур воздуха (до -20°C). Кроме того, следует отметить, что микроклиматические исследования в зимний период на территории ББС были проведены впервые в истории станции.

На основе полученных нами данных для всех станций был проведен анализ временного хода метеорологических параметров в разных точках полигона в условиях наблюдавшейся синоптической ситуации.

По техническим причинам на станции «губа» запись данных АМС осуществлялась только за период с 1 по 4 февраля 2010 года, поэтому, для однородности рядов на всех точках, при анализе основных метеопараметров использовались данные на всех трех станциях только за указанный период.



Рис.2.1 Карта района экспедиции в указанном местоположении полыньи и размещением микроклиматических точек по полигону (стилизованнные значки АМС: Мыс – «база», Радикулит – «холм» и Кислая губа - «губа»).

2.1 *Ход метеорологических параметров за период экспедиции на разных станциях*

Температура воздуха

Одной из задач, поставленных нами в экспедиции, было выяснение степени тепляющего влияния полыньи пролива Великая Салма на температуру воздуха вблизи нее с помощью инструментальных наблюдений. Поэтому важным представлялось сравнение временного хода температуры воздуха на станциях «база» и «губа», находившихся на побережьях водных объектов, при этом одна из станций располагалась поблизости от полыньи, а другая - на льду замерзшей Кислой губы вдали от участков открытой воды.

Однако, за период экспедиции значения температуры воздуха на станциях на базе и в Кислой губе различались очень мало – не более, чем на десятые доли градуса. Средняя температура на базе за весь период экспедиции составила $-5,1^{\circ}\text{C}$, на Кислой губе $-5,0^{\circ}\text{C}$. Отсутствие значимого тепляющего влияния полыньи не проявилось в наблюдавшихся в период экспедиции синоптических условиях на данных АМС, однако это не может

свидетельствовать об отсутствии этого влияния в принципе. Для более полного изучения этого вопроса и выявления тепляющего эффекта нами было использовано численное моделирование (ссылка на следующие главы).

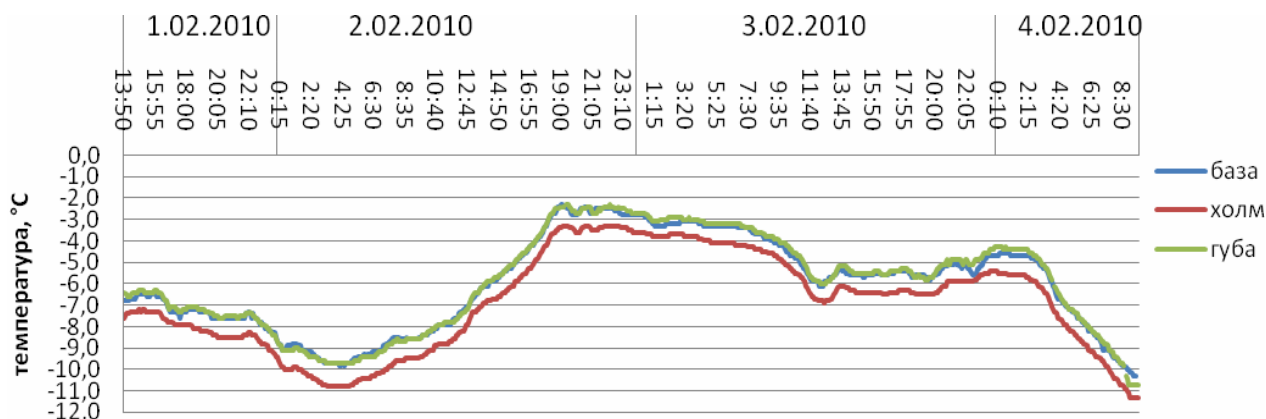


Рис. 2.2 Временной ход температуры воздуха в трех точках полигона в период с 1.02.2010 по 4.02.2010 г.

В то же время значения температуры на вершине холма в течение всего периода наблюдений были примерно на один градус ниже, чем на обоих берегах (рис.2.2). Средняя температура здесь составила $-5,9^{\circ}\text{C}$. Такие различия связаны, прежде всего, с разницей абсолютных высот точек, на которых располагались станции – станция на вершине холма находилась на высоте около 100 м над уровнем моря, две другие станции – на высоте ~ 0 м. Во влажном ненасыщенном воздухе получившиеся значения близки к величине сухоадиабатического градиента - $1^{\circ}\text{C}/100$ м. Значения дисперсии температуры за период наблюдений на всех трех станциях оказались сопоставимы и составили 4,8 на базе, 5,1 на станции «губа» и 5,2 на станции «холм».

Влажность воздуха

Значения относительной влажности воздуха на всех трех станциях различались мало, средние значения за весь период наблюдений составили 84,2% и 83,8% на базе и в Кислой губе соответственно, и 86,2% на вершине холма (что обусловлено более низкими температурами на этой точке и, следовательно, меньшими значениями парциального давления насыщения E). В течение периода наблюдений отмечается рост значений относительной влажности на всех станциях от $\sim 70\%$ 28 января до 90% 2 февраля (максимум в этот день связан с прохождением теплого фронта), в последние дни рассматриваемого периода относительная влажность снова начала слегка понижаться (рис.2.3). В целом, повышение значений относительной влажности воздуха можно объяснить поступлением в район ББС более теплого и влажного воздуха в южных потоках.

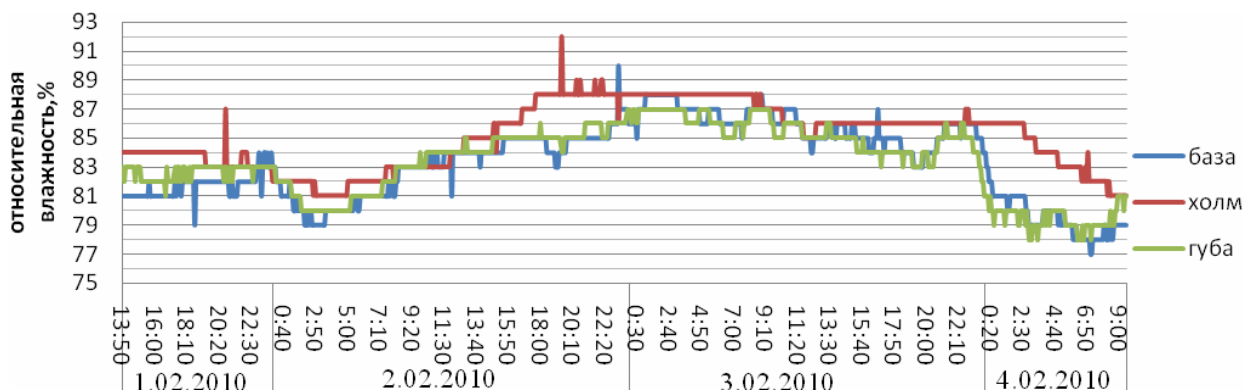


Рис.2.3 Значения относительной влажности воздуха в трех точках полигона за период 1-4.02.2010г.

2.2 Суточный ход температуры.

Ни в один из дней за весь период наблюдений суточный ход температуры не был «классическим», т.е. с минимумом в утренние часы и максимумом во второй половине дня (рис. 2.4). Это объясняется тем, что в значительной степени суточный ход определялся, по-видимому, особенностями синоптической ситуации. Так, например, значительный рост температуры (с $-8,5^{\circ}\text{C}$ в 10:00 до $-2,5^{\circ}\text{C}$ в 19:00 для станции на базе) во второй половине дня 2.02.2010 связан с прохождением теплого фронта, а достаточно малая амплитуда температуры (около $3,5^{\circ}\text{C}$ - 4°C) 1.02.2010 обусловлена сплошной слоистообразной облачностью, препятствующей радиационному нагреву и выхолаживанию. Похолодание 4.02.2010 связано с прохождением холодного фронта.



Рис. 2.4 Суточный ход температуры воздуха за 31.01. и 2.02.2010г.

Что касается различий в суточном ходе на различных станциях, то во второй половине экспедиции они практически синхронны, время наступления минимумов и максимумов отличается не более, чем на 10-15 минут. В первые дни экспедиции, когда наблюдались более значительный суточный ход и более низкие температуры воздуха, на точке на вершине холма вследствие большей закрытости этой станции время наступления максимумов и минимумов запаздывало относительно станции на базе почти на час (30.03.10).

2.3 Роза ветров и скорость ветра

Измерения скорости ветра проводились не на стандартной высоте 10 м, а на уровне 2 м над поверхностью земли, что обусловлено конструкцией автоматических метеостанций.

На графике, отражающем преобладающее направление ветра на каждой из трех станций, четко прослеживаются различия в преобладающем направлении: восточное на базе, и в Кислой губе и юго-восточное на вершине горы Ругозерской (Радикулит) (рис.3.5).

Это может объясняться влиянием особенностей конфигурации суши и воды в рассматриваемом регионе (см. рис.3.1), которые обуславливают отклонение потока воздуха в разных участках полигона. Что касается скорости ветра, то все графики изменения ее значений выглядят согласованными (одновременное усиление и ослабление ветра), однако абсолютные значения скорости на разных станциях существенно различаются. Так, можно отметить значительно меньшие значения скорости ветра на вершине холма (не более 4 м/с, в

среднем – 1,7м/с) по сравнению со станциями на базе и в Кислой губе, что объясняется неровностью рельефа и залесенностью поверхности, имеющей значительно большую шероховатость, которая обуславливает снижение скорости ветра.

Роза ветров

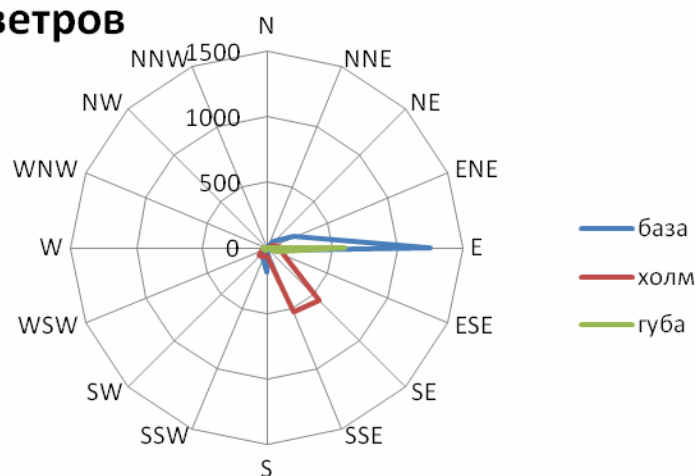


Рис.2.5 Диаграмма преобладающих направлений ветра в трех точках полигона за период 28.01.2010 – 4.02.2010гг.

При сравнении станций на побережьях несколько большие скорости (в среднем 4,5 м/с) отмечаются на базе. Это, возможно, связано с тем, что станция в Кислой губе (средняя скорость 3,5 м/с) располагается в месте, где сильнее сказывается влияние суши, имеющей большую шероховатость (губа со всех сторон, кроме восточной, окружена лесом, а вход в нее на востоке закрывается островом, что может сказываться на некотором снижении скорости ветра). В то же время станция на базе находится около вдающегося в залив мыса и открытое пространство над льдом значительно меньше препятствует разгону воздуха. Максимальная скорость ветра в период экспедиции отмечалась на базе ночью 31 января и достигала 12 м/с.

Таким образом, непосредственно по результатам микроклиматических измерений, возможно сделать **следующие выводы**:

1. Отсутствие существенной разницы в значениях температуры воздуха на станциях «база» и «губа» в период экспедиции говорит об отсутствии значимого тепляющего влияния полыни в наблюдавшихся синоптических условиях. Суточный ход температуры воздуха также определялся особенностями синоптической ситуации.
2. Разница в преобладающем направлении ветра была обусловлена особенностями рельефа территории и конфигурацией суши и воды.
3. Сравнительно невысокая скорость ветра на станции «холм» определялась большей шероховатостью залесенной подстилающей поверхности по сравнению с двумя другими станциями. Более высокие скорости ветра на станции «база» обуславливались большей открытостью территории по сравнению со станцией «губа».

Глава 3.

Моделирование турбулентной конвекции над полыньей с помощью вихререзающей модели

Для моделирования распространения тепла, поступающего от полыньи, в пограничном слое атмосферы (далее - «тепловой след полыньи») была использована модификация вихререзающей модели пограничного слоя, разработанной А.В. Глазуновым в Институте вычислительной математики РАН. Эта гидродинамическая численная модель предназначена для расчета нестационарной трехмерной динамики вихревых структур в геофизических турбулентных потоках при очень больших числах Рейнольдса. В модели используется замыкание граничных условий по боковым граням. Модель успешно прошла верификацию в тестовом случае устойчиво стратифицированного потока в высоких широтах (Glazunov and Lykossov, 2003). Использование данной модели обусловлено необходимостью воспроизвести турбулентные течения на размерах, для большинства других моделей (например, WRF) являющихся подсеточными.

В связи с огромным количеством вычислений, появляющихся в решении уравнений, описывающих турбулентные течения, данная модель реализована с помощью технологии параллельных (многопроцессорных) вычислений. Поэтому расчеты модели производились на суперкомпьютере «Чебышев» (Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ). Так, в итоговых экспериментах расчетная область составляла 750x288x24 точки конечно-разностной сетки, что составляет чуть больше 5 миллионов узлов сетки, в связи с чем при расчетах использовалось 384 процессора одновременно. При этом машинное время численного эксперимента не превышало 10 минут.

Задачей данных экспериментов было выявление влияния полыньи на температуру приземного воздуха в окрестности АМС «База». В связи с нестационарностью воздушных потоков над полыньей и прилегающей территорией, а также ограниченностью во времени и вычислительных средствах тепловой след исследовался как изменение хода температуры в точке, а также по вертикальным и горизонтальным сечениям поля температуры. Длительность экспериментов в терминах модельного времени составляла несколько десятков минут, что не является сильным ограничением, так как «фоновые» значения температуры, судя по данным АМС, изменялись на величину точности прибора за много большее время. В качестве подготовительной работы в модель была встроена возможность пространственной вариации температуры и шероховатости поверхности, а также вывод горизонтальных и вертикальных сечений полей температуры, компонент скорости ветра, потока явного тепла в заданный момент времени и вывод временного ряда температуры в заданной точке. Затем были проведены эксперименты, в которых варьировалась температура поверхности и пограничного слоя, а также скорости ветра в пределах, представленных данными наблюдений на АМС «База», в которых модель показала себя устойчивой. Так, тестовые эксперименты показали, что тепловое влияние полыньи сильнее проявляется при меньших температурах воздуха и подстилающей поверхности. Также было установлено, что при усилении устойчивости стратификации уменьшается рост температуры, но увеличиваются горизонтальные размеры теплового следа.

Таким образом, методологически задача состояла в проведении 2-х экспериментов, причем в качестве начальных условий первого эксперимента использовались осредненные показания АМС «База» за первый день экспедиции, как наиболее холодный, а именно: температура поверхности $-23,6$ °С, температура на уровне 2 м $-20,5$ °С (так как разрешение модельной сетки 10 м, для перевода температуры с высоты 10 м на высоту 2 м и обратно использовался логарифмический закон распределения температуры по высоте в приземном слое атмосферы), ветер 8 м/с восточный, данные о стратификации были взяты из расчетов модели WRF на этот день. Полынья аппроксимировалась как эллипс с полуосями 1750 и 200 м (форма полыньи хорошо прослеживается на рис.3.1), что представляется оправданным допущением в связи с тем, что при используемом пространственном разрешении модели

невозможно достаточно точно представить кромку полыньи. Температура поверхности полыньи вводилась, в согласии с данными экспедиции НСО кафедры океанологии, как $-1,4^{\circ}\text{C}$. Во втором эксперименте использовались те же входные данные, но направление ветра было подобрано так, чтобы тепловой след полыньи проходил точно через точку наблюдений (азимут направления ветра $83,5^{\circ}$).

Как видно из рис.3.1 и рис.3.2 тепловой след заметно меняет свою структуру даже при небольшом изменении направления ветра, но надо иметь ввиду что это смена фонового потока, которая происходит за время синоптических периодов, тогда как небольшие флуктуации направления ветра в точке обуславливаются сильной турбулизированностью потока воздуха. Если же обратить внимание на рис.3.1.a, то можно заметить, что даже при сильном фоновом ветре наблюдать увеличение температуры на высотах 1-8 м не приходится. Также стоит отметить то, что высота конвективного перемешанного слоя над полыньей на рис.3.1.a не превосходит 200 м из-за особенности модели, но тестовые эксперименты с большим размером области по высоте показали, что при подобных условиях стратификация след не поднимается выше 400-500 м.

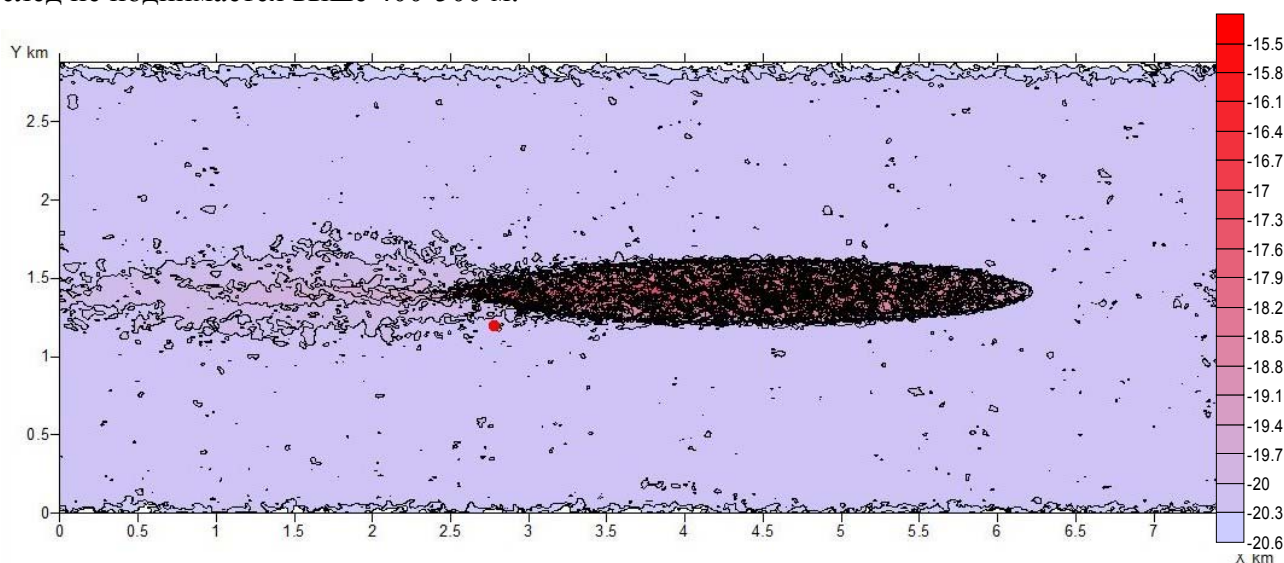


Рис.3.1. Горизонтальное сечение поля потенциальной температуры на высоте 10 м, численный эксперимент 1, красным кружком показано расположение АМС.

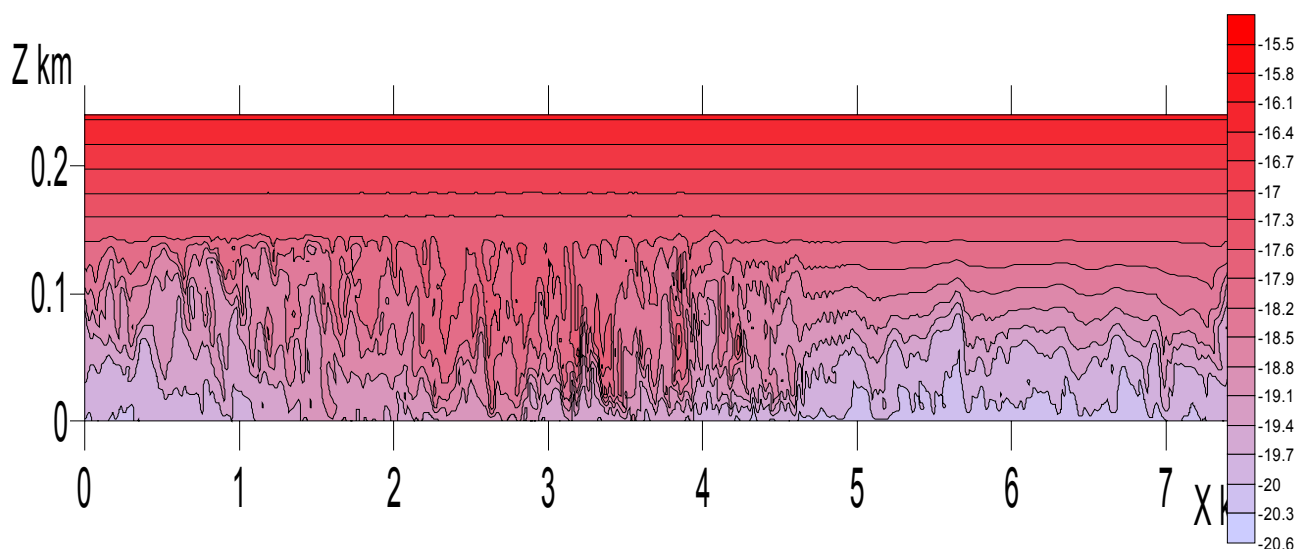


Рис.3.1.a. Вертикальное сечение поля потенциальной температуры через середину полыньи эксперимент 1.

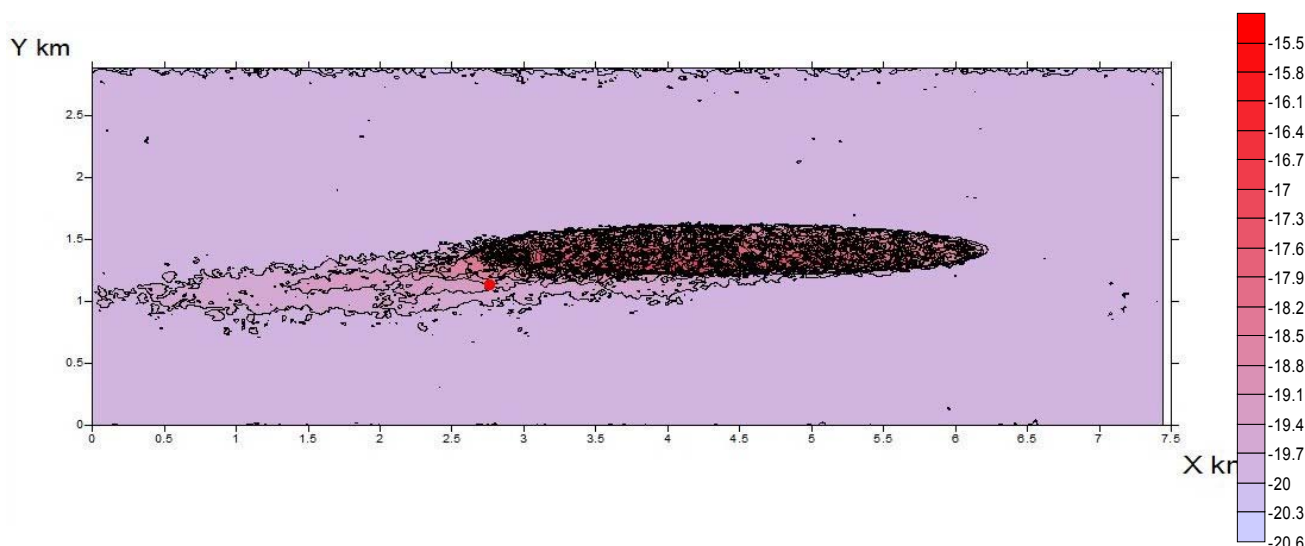


Рис.3.2. Горизонтальное сечение поля потенциальной температуры на высоте 10м, численный эксперимент 2, красным кружком показано расположение АМС.

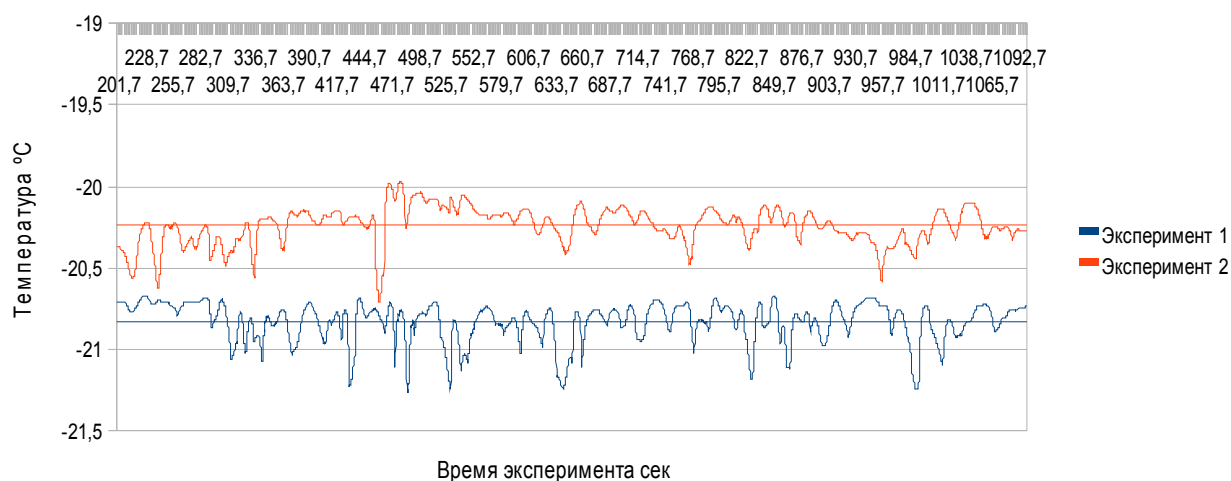


Рис.3.3.График хода потенциальной температуры на высоте 2м в точке «База» по данным моделирования.

Рис.3.3 демонстрирует различия хода потенциальной температуры в точке «База», из него видно что разница осредненных величин составляет значения порядка $0,59^{\circ}\text{C}$. Но также имеют место и случайные колебания температуры с амплитудой до $1,5^{\circ}\text{C}$, что объясняется сильной турбулизированностью потока воздуха с полыньи.

Таким образом, моделирование показало, что при синоптических условиях, имевших место в период экспедиции, зафиксировать тепловой след полыньи доступными (и согласованными с Т.Б) способами измерения было невозможно. Но при благоприятных синоптических условиях тепловой след проявился бы, согласно результатам моделирования, в увеличении средней температуры на $0,5^{\circ}\text{C}$.

Глава 4. Потоки тепла над акваторией

Полынья – явление, характерное для акваторий северных широт в зимнее время. Она формирует местные условия, учёт которых позволит улучшить прогноз в пункте, близком к полынье. При благоприятном направлении ветра отепляющее влияние полыньи выражается в значении температуры на суше (см. главу 3). Вне зависимости от направления ветра,

полюнья вносит ощутимый вклад в структуру потоков тепла над акваторией за счёт того, что температура поверхности полюнья постоянна и составляет $-1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ и, кроме того, полюнья является постоянным источником водяного пара. Потоки явного тепла (H), характеризующие контактный теплообмен с атмосферой, и скрытого тепла (LE), обусловленного фазовыми переходами воды на поверхности, являются значимыми компонентами теплового баланса. Именно они, в конечном итоге, определяют характер взаимодействия между атмосферой и подстилающей поверхностью, и от точности их учёта напрямую зависит качество прогноза погоды.

Использовать данные прямых измерений для количественной оценки влияния полюнья на потоки тепла с акватории в рамках данной экспедиции не представляется возможным: контактные измерения трудновыполнимы и подчас противоречат технике безопасности. Поэтому наиболее приемлемым и в то же время физически оправданным путём является физико-математическое моделирование. В данном случае была использована одномерная гидротермодинамическая модель LAKE (Степаненко и Лыкосов, 2005), разработанная в НИВЦ МГУ. Выбор именно этой модели был продиктован тем, что она позволяет учесть перенос тепла в системе «почва-вода-лёд-снег-атмосфера», а также потому, что эта модель положительно зарекомендовала себя участием в таких международных экспериментах, как LakeMIP (MIP – Model Intercomparison Project).

Температура и влажность воздуха, давление, количество осадков, скорость и направление ветра, эффективное излучение и суммарная радиация, зафиксированные автоматической метеостанцией, установленной на мысе Крестовый, послужили входными данными для модели. При проведении численных экспериментов также были учтены такие характеристики, как высота снежного покрова, толщина льда, глубина воды, температура и солёность воды, а также скорость течения (часть этих данных получена членами экспедиции кафедры океанологии географического факультета МГУ, проводившейся в это же время).

Работа с моделью проходила в два этапа. На первом этапе - этапе валидации модели - было проведено сопоставление тепловых характеристик подстилающей поверхности, рассчитанное моделью, и данных о температуре поверхности припайного льда, измеренной срочными, минимальными и максимальными термометрами в ходе регулярных метеонаблюдений (рис. 4.1). Оценки показали, что максимальное мгновенное отклонение рассчитанной и измеренной температурой составляет не более $1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Такое расхождение можно считать приемлемым, особенно если учитывать тот факт, что из-за частых снегопадов и метелей термометры нередко были припорошены снегом.

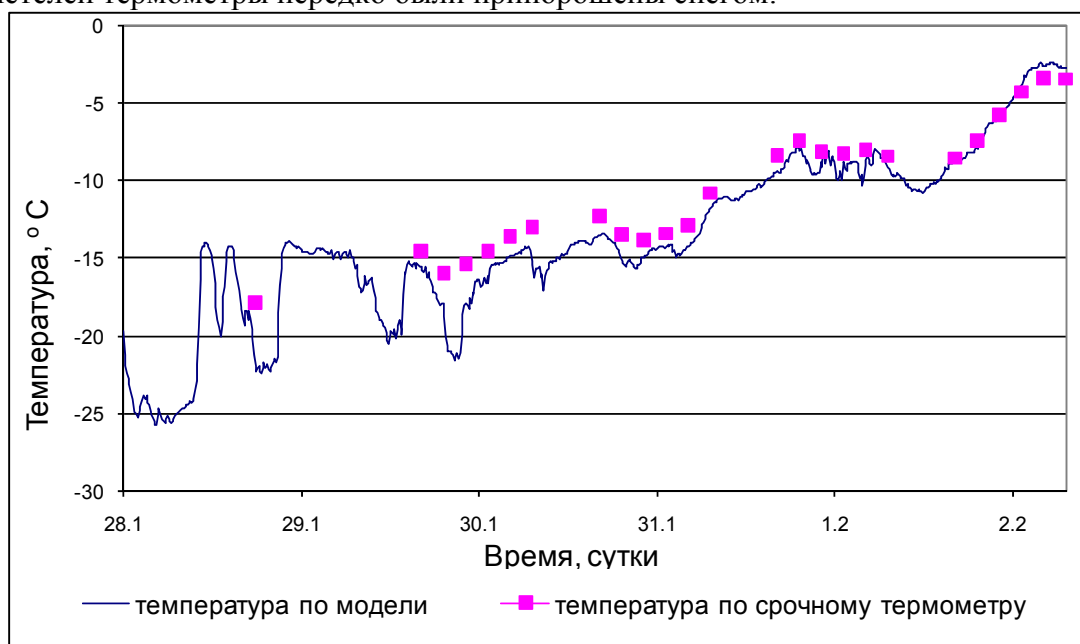


Рис. 4.1. Сравнение выходных данных модели и данных измерений температуры по срочному термометру

Второй этап работы с моделью заключался в обработке и анализе рассчитанного моделью временного хода и средних величин потоков явного и скрытого тепла для двух участков акватории – покрытого снегом и льдом и открытого.

Временной ход потоков явного и скрытого тепла представлен на рис. 4.2 и рис. 4.3. В первом эксперименте, описывающим участок полыньи, глубина воды была задана равной 10 метрам, а ледяной и снежный покров отсутствовал. Во втором эксперименте глубина воды была 9,65 метров, толщина льда – 35 сантиметров – в сумме они составляют 10 метров и, тем самым, находятся на одном уровне с кромкой полыньи.

Анализ временного хода потоков тепла над различными частями акватории позволяет обнаружить следующие закономерности. Во-первых, потоки тепла над полыньёй по абсолютной величине в десятки раз больше аналогичных потоков над остальной акваторией. Это объясняется тем, что поверхность полыньи всё время теплее вышележащего слоя воздуха (неустойчивая стратификация) и, кроме того, поверхность открытой воды является постоянным источником водяного пара. Во-вторых, потоки над полыньёй в течение всего периода положительны, в то время как потоки над участком акватории, покрытой льдом и снегом, почти всё время отрицательные. 2 и 3 февраля поток явного тепла над поверхностью акватории, покрытой льдом, увеличивается за счёт повышения температуры воздуха. В то же время поток скрытого тепла остаётся отрицательным и увеличивается по модулю за счёт конденсации атмосферной влаги на поверхности.



Рис. 4.2. Потоки тепла над участком акватории, покрытого льдом и снегом



Рис. 4.3. Потоки тепла над полыньёй

Средние за время экспедиции величины потоков приведены в таблице 4.1. С учётом площадей соответствующих участков, потоки тепла с акватории будут выражаться следующим образом:

$$H = \frac{S_1 \times H_1 + S_2 \times H_2}{S}; \quad LE = \frac{S_1 \times LE_1 + S_2 \times LE_2}{S}$$

В этой формуле потоки явного (H) и скрытого тепла (LE) с индексом 1 – относятся к полынье, а 2 – к участку акватории, покрытому снегом и льдом. Подсчёт площади полыньи

(S_1) (с привлечением изображений со спутника Modis) и пролива Великая Салма (S_2) был выполнен Дмитрием Кузнецовым с помощью программы ArcGIS.

Таблица 4.1. Средние величины потоков тепла над различными участками акватории

	Площадь, км ² (доля от общей площади)	Поток явного тепла, Вт/м ²	Поток скрытого тепла, Вт/м ²
Полынья	$S_1 = 0,8$ (5,8%)	$H_1 = 115$	$LE_1 = 64$
Участок акватории, покрытый льдом и снегом	$S_2 = 13,2$ (94,2%)	$H_2 = -2,9$	$LE_2 = -8,7$
Вся акватория	$S = S_1 + S_2 = 14$ (100%)	$H = 4$	$LE = -4,4$

Несмотря на незначительную площадь полыньи, она внесла существенный вклад в структуру потоков тепла: поток явного тепла сменил знак с отрицательного на положительный, а поток скрытого тепла остался отрицательным, но уменьшился по модулю. Суммарный поток явного и скрытого тепла с акватории становится слабоотрицательным и составляет $-0,4$ Вт/м².

На основании проделанной работы можно сделать *следующие выводы*:

- Одномерная гидротермодинамическая модель водного объекта LAKE удовлетворительно воспроизводит температурный режим поверхности льда (с максимальным мгновенным отклонением равным $-1,4$ °C) и может быть использована для расчёта потоков явного и скрытого тепла
- Влияние полыньи в проливе Великая Салма на потоки тепла выражается в следующем: поток явного тепла меняет знак с отрицательного на положительный, а поток скрытого тепла и суммарный поток явного и скрытого тепла остаётся отрицательным, но становится меньше по модулю
- Акватория пролива Великая Салма является типичной для данных широт и времени года и полученные результаты можно применить к соседним акваториям и использовать, например, при уточнении прогноза погоды в пункте, испытывающем влияние подобных местных условий.

Глава 5.

Пространственное распределение снежного покрова и его теплообмен с атмосферой

Потоки явного и скрытого тепла в приземном слое атмосферы оценивались в главе 4 для акватории. Однако значительную долю площади рассматриваемого района занимает суша (п-ов Киндо), поэтому для оценки интегральных потоков со всего района необходимо оценить также потоки тепла над этой поверхностью.

Непосредственно измерить потоки явного и скрытого тепла в полевых условиях - сложная и трудоемкая задача, требующая специального дорогостоящего оборудования. Однако существуют физико-математические модели, позволяющие рассчитать эти величины, используя в качестве входных параметров данные о температуре и влажности воздуха, атмосферном давлении, скорости ветра, суммарной солнечной радиации, эффективном излучении, высоте и плотности снежного покрова.

Большинство этих параметров непосредственно измерялись автоматическими метеорологическими станциями (АМС) во время экспедиции (кроме эффективного излучения, которое легко рассчитывается, исходя из данных о температуре воздуха). Однако для модели необходимы также данные о высоте и плотности снежного покрова. Они были получены в результате проведения снегомерной съемки. Поэтому первый раздел настоящей главы посвящен результатам анализа данных снегомерной съемки.

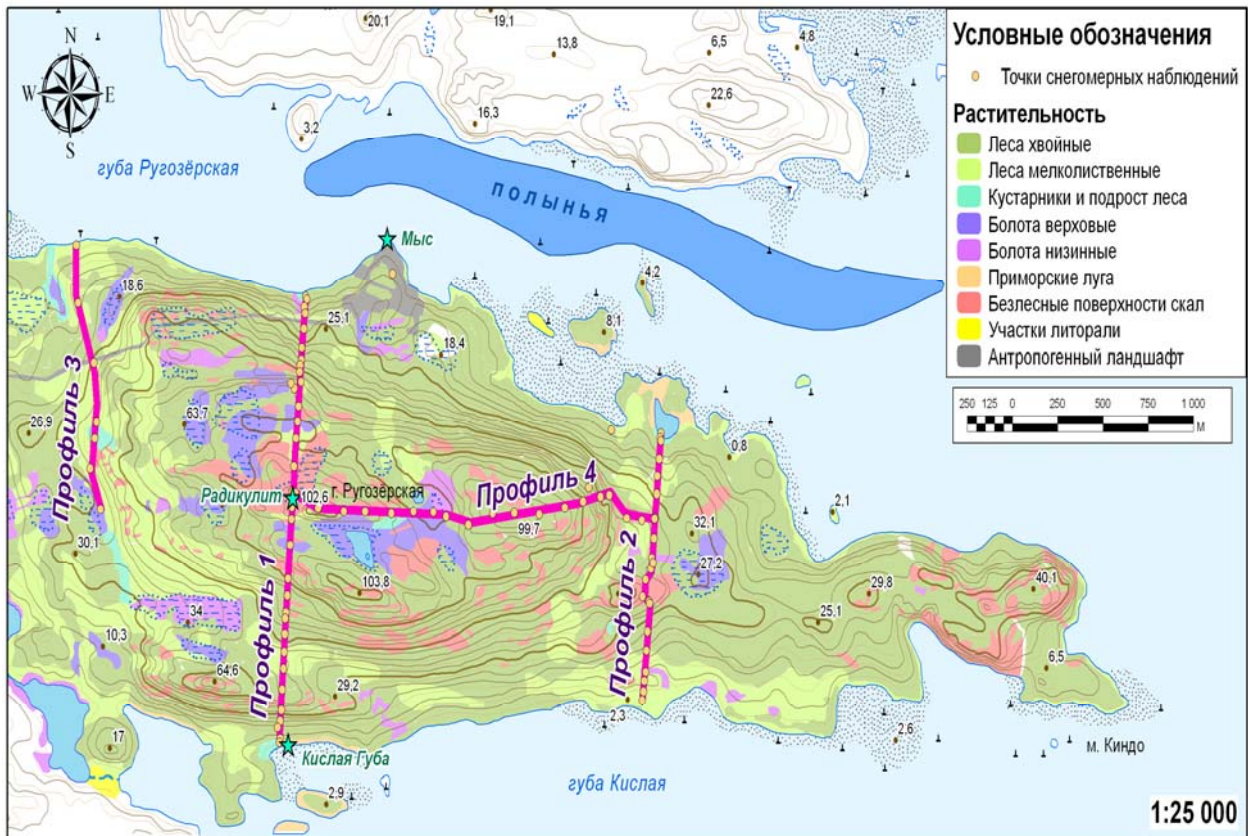


Рис. 5.1. Карта снегомерных маршрутов

5.1. Пространственное распределение снежного покрова

В течение нашей экспедиции было проведено измерение высоты снежного покрова на 4 маршрутах (рис. 5.1) снегомерной рейкой и плотности снега с помощью снегомера. Рейка снегомерная была изготовлена из бруска сухого дерева, на котором была нанесена шкала в сантиметрах. Высоту снега измеряли как на плотномерных точках, так и между ними во время передвижения по маршруту, для получения более длинных выборок для построения статистического распределения. В ходе снегосъемки при измерении высоты снежного покрова снегомерную рейку погружали в снег вертикально до поверхности почвы и снимали отсчет с точностью до 1 см.

Снегомер состоял из металлического цилиндра и весов, на одном конце цилиндра имелось кольцо с режущими зубьями, а другой конец закрывался крышкой. При взятии пробы снега цилиндр снегомера погружался отвесно в снег, слегка вдавливался, по шкале цилиндра отсчитывалась высота снега. Далее лопаточкой отгребали снег с одной стороны и подводили ее под нижний край цилиндра (это так же позволяло судить о наличии корочек (которые образуются во время оттепелей) и резких изменений плотности за весь период). Поднимали цилиндр вместе с лопаточкой, переворачивали его нижним концом вверх и взвешивали полученную пробу снега. Далее во время обработки данных плотность снега рассчитывалась по формуле:

$$\rho = \frac{100(M - m)}{H},$$

где ρ – плотность снега, M – отсчет плотномера, m – «место нуля» плотномера, H – высота снега.

Наибольшая плотность снега была получена по данным с 4-го маршрута среди крупнолыбового курума ($265,9 \text{ кг/м}^3$) (при высоте снега 43 см), наименьшая на маршруте 2 ($111,3 \text{ кг/м}^3$), на поверхности, занятой сосняком.

На формирование снежного покрова влияют многие факторы. Рассмотрим на примере снегомерного профиля №1 выявленные закономерности для формирования и характеристик снежного покрова.

-Значительное влияние оказывает характер и вид растительности. При древесной растительности важны вид и разреженность древостоя. Распределение снежного покрова на лесных участках более равномерно, чем на безлесных, что можно объяснить снижением скорости ветра и ослаблением метелевого переноса на лесных участках. Среди лесных участков также можно провести дифференциацию. Характер древесной растительности и высота снежного покрова в лесу взаимосвязаны. В березовом лесу кронами деревьев задерживается меньше снега, чем в сосновом, и меньше чем в еловом. Соответственно при прочих равных, высота снега в лиственных будет больше, чем в сосновых, и больше чем в еловых лесах, что и наблюдается нами на снегомерном профиле.

-минимум высоты снежного покрова наблюдается на вершине горы, где отсутствует растительность и постоянно дует ветер, то есть происходит дефляция снега (минимум выделен на рис.5.1.);

-на склоне наблюдается постепенное уменьшение высоты снега, затем локальный минимум на тыловом шве и резкое возрастание к бровке, где формируется карниз снега (соответственно, 2-ая, 3-ья, 4-ая стрелки слева на рис.5.2.);

-увеличение высоты снега в районах снегонакопления (отрицательные формы рельефа, бровки);

-высота снега больше на пологих склонах, в то время как плотность больше на более крутых склонах;

-в большинстве случаев плотность снега возрастает вместе с увеличением высоты снега (усиливается деформация под действием собственного веса), но также и в отрицательных формах рельефа;

-характерно увеличение значений для плотности на литорали, для которой характерен открытый тип территории, значительные скорости ветра и, соответственно, метелевый перенос, а также большое значение приходящей солнечной радиации.

Таким образом, формирование снежного покрова в значительной степени определяется метеорологическими условиями и характером земной поверхности. При отсутствии ветра во время снегопада снег распределяется равномерно, однако, на склонах гор крутизной до 50° его толщина на крутых склонах будет меньше, чем на пологих. В условиях верховой метели снежинки, достигающие поверхности, не могут сразу закрепиться и начинают скользить, катиться или сальтировать по поверхности. Хрупкие снежинки разрушаются и переносятся в понижения рельефа или задерживаются в подветренных местах около препятствий, что порождает неоднородность в распределении снежного покрова. Также при этом увеличивается средняя плотность снега. Существенное перераспределение снега в снежном покрове происходит и при низовых метелях, которые часто бывают спустя некоторое время после прекращения снегопада. При низовой метели выделяют три типа участков: участки снегосъема, участки снегопереноса с относительным равновесием между дефляцией и снегоотложением и участки снегонакопления. По мере увеличения количества снега происходит увеличение неоднородности, сдувание снега с положительных форм рельефа и возникновение больших надувов в понижениях, образуются карнизы на гребнях и бровках горных плато.

Важную роль в изменении снежного покрова играет метаморфизм снега (в данном случае, в основном, изотермический и температурогradientный). При одинаковых температурных условиях на поверхности снежного покрова градиент температуры больше на тех участках, где меньше толщина покрова, поэтому при одинаковой высоте снежного

покрова он (а следовательно и плотность) возрастает по мере увеличения угла наклона склона.

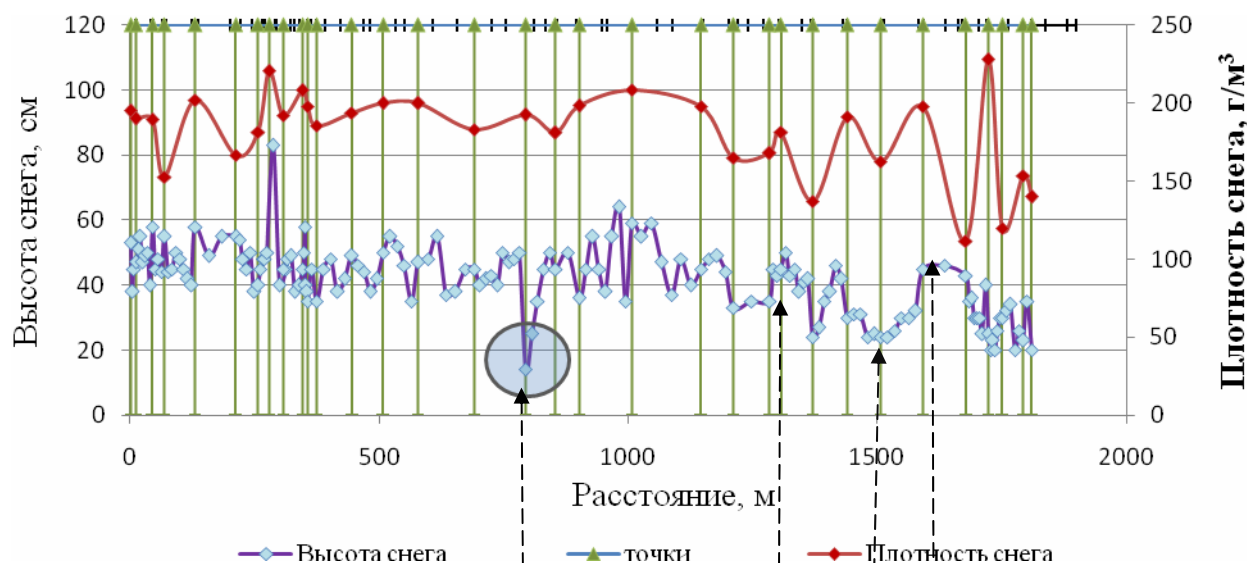


Рис.5.2. Снеговой профиль №1. Высота и плотность снежного покрова.

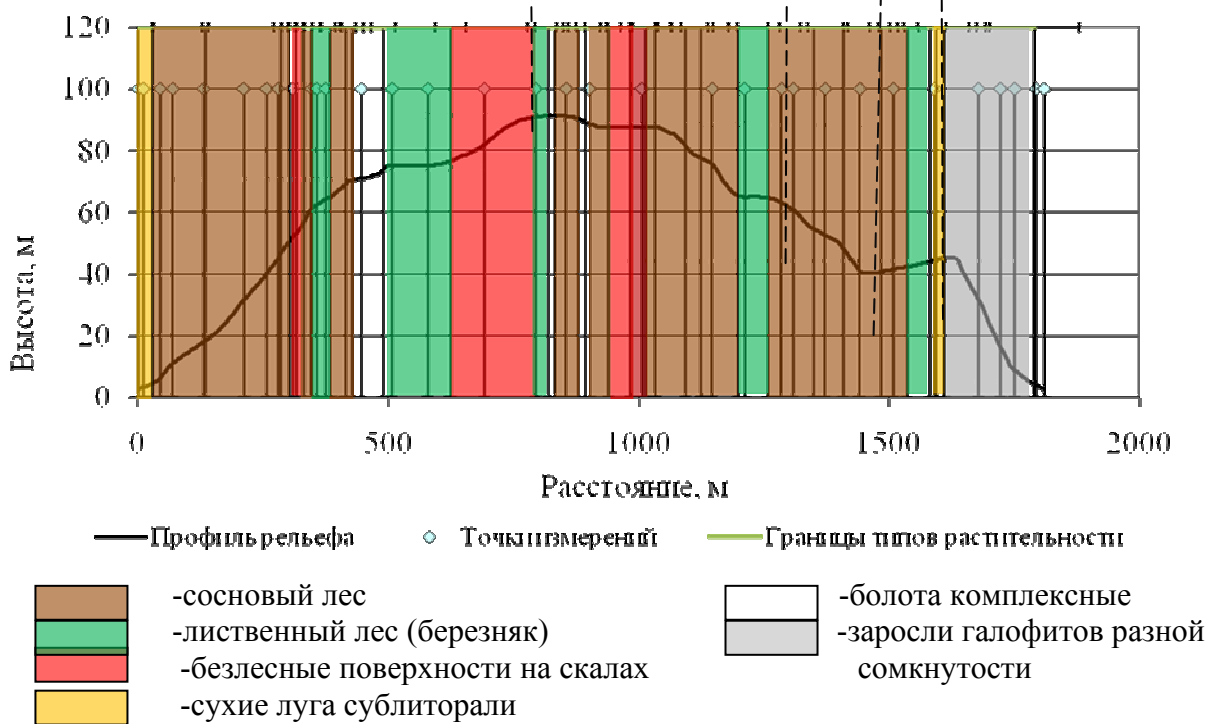


Рис.5.3. Гипсометрический профиль

Значительных изменений в количестве осадков на профилях вследствие расположения г. Радикулит и г. Ругозерская по отношению к пологим ожидать не приходится, так как превышение в 100 м не является достаточным для значительного выпадения осадков.

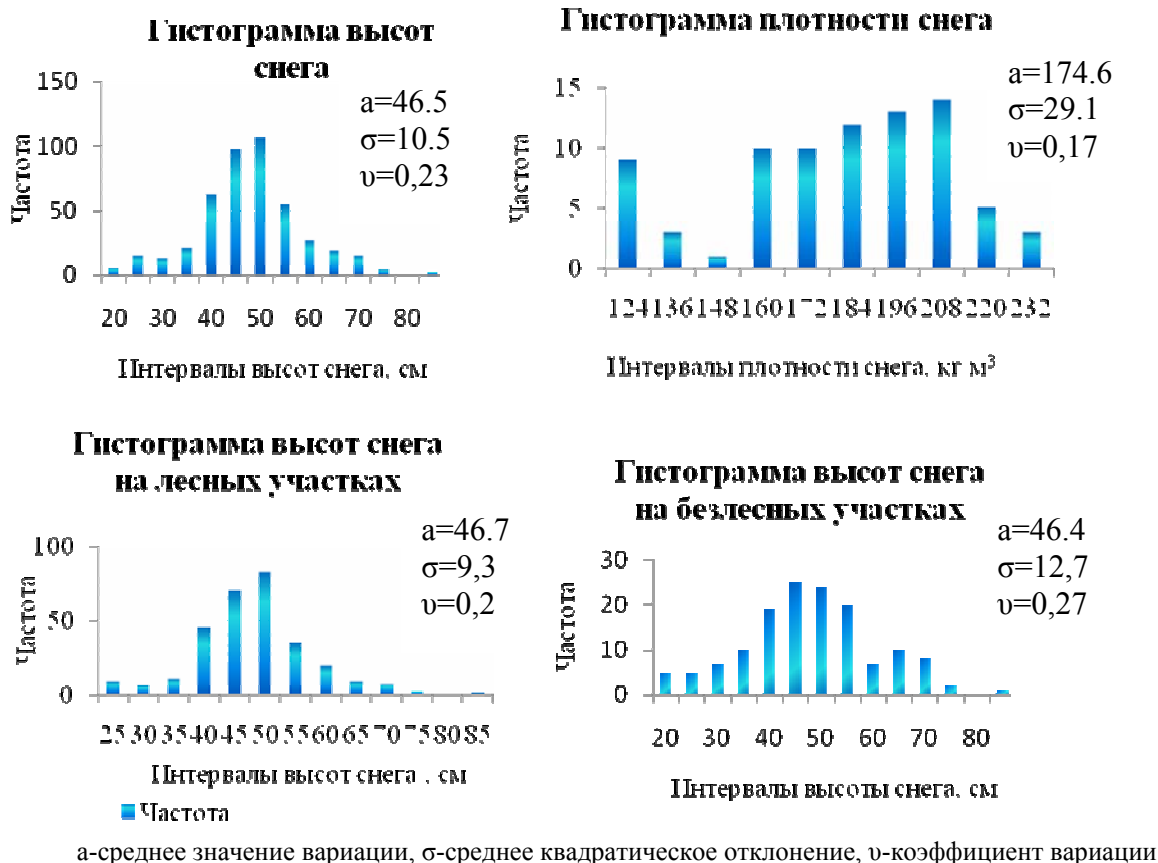


Рис.5.4. Статистические характеристики распределения снежного покрова

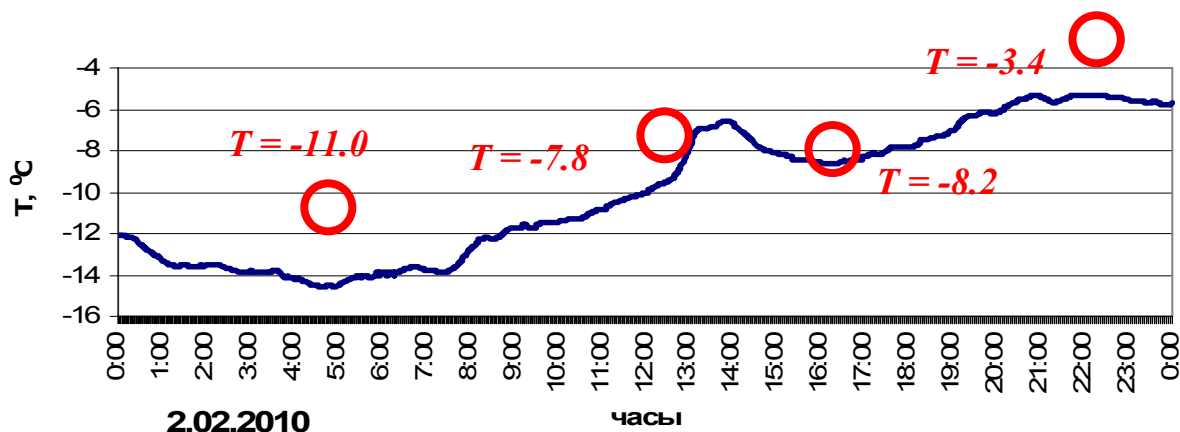
Характерными высотами являются 35-65 см (максимум вероятности- 45-50 см). Хотя для леса характерен определенный интервал значений, на гистограмме (рис.5.4) видно распределение близкое к нормальному. Во многом это объясняется значительным изменением рельефа-крутизны склонов, наличием ровных участков, понижений и т.д.

На безлесных участках максимум вероятности высоты снега приходится на 34-55 см, то есть для них также не характерны очень низкие значения, как можно было ожидать. Принципиально заметить, что нормальное распределение высот снега объясняется разными значениями высот для литоралей, болот, поверхности скал. Болота располагаются в естественных понижениях рельефа, в которые при низовых метелях надувается снег (характерные высоты 33-50 см). Участки с растительностью, характерной для поверхности скал, находятся, как правило, либо на вершине горы, либо на резком склоне с последующим углублением. В данном случае также образуются надувы ветром и карнизы снега (44-67см). Литораль располагается на относительно ровных участках, где существенно влияние ветра, переносающего снег в отрицательные формы рельефа. (Характерные высоты 21-47см). Пересечение характерных интервалов высот для каждого типа растительности и обеспечивает наибольшую вероятность в интервале 34-55 см при общем рассмотрении безлесных поверхностей.

5.2 Оценка теплообмена снежного покрова с атмосферой

Инструментом оценки являлась модель деятельного слоя суши Института вычислительной математики (ИВМ) РАН (Мачульская и Лыкосов, 2002). Для определения степени применимости модели к условиям изучаемой местности была проведена ее валидация. Модель в качестве выходного продукта выдает не только величины потоков явного и скрытого тепла, но также и температуру подстилающей поверхности. Поскольку температура определяет во многом значения потоков тепла, значения температуры

поверхности, рассчитанные моделью, были сопоставлены с данными поверхностных термометров (минимальных, максимальных и срочных термометров).



○ Температура поверхности, измеренная напочвенными термометрами

Рис 5.5. Сравнение температуры поверхности, измеренной напочвенными термометрами с температурой, рассчитанной моделью деятельного слоя суши (синяя линия), для открытой местности

Сравнение фактических данных с данными модели проводилось для двух типов ландшафтов: открытого и покрытого елово-лиственничным лесом. Выбору именно этих двух ландшафтов послужили два обстоятельства: во-первых, там были установлены напочвенные термометры, а во-вторых, это два самых распространенных на территории ББС вида местности.

Результаты сравнения фактических и модельных данных для открытого участка представлены на рисунке 5.5 на примере 2 февраля. Анализируя рисунок 5.5 и аналогичные результаты для залесенного участка, можно сделать следующие выводы: во-первых, модель довольно точно воспроизвела суточный ход температуры поверхности, хотя фактическая и модельная температуры отличаются на 1-3°C. Стоит отметить, что модель адекватно воспроизвела «нетипичный» суточный ход 2.02, в котором наблюдалось повышение температуры в ночные часы, связанное с прохождением теплого фронта. Во-вторых, модель несколько занижает температуру. Значения осредненных разностей фактической и модельной температур представлены в таблице 5.1. Следует отметить, что это отличие, по крайней мере отчасти, является следствием того, что напочвенные термометры в период экспедиции за ночь заносились снегом, и в момент снятия показаний находились под снегом на глубине порядка 5 – 10 см.

Таблица 5.1. Разности фактической температуры поверхности и температуры поверхности, рассчитанной моделью деятельного слоя суши, осредненные за период экспедиции*

Ландшафт	ΔT (°C)
Открытая местность	-1.9
Елово-лиственничный лес	-2.6

*вычислены без учета поправки на то, что напочвенные термометры в момент снятия показания находились под снегом

Деятельный слой суши на территории Беломорской Биологической станции представлен различными ландшафтами. Каждый ландшафт характеризуется своими

значениями потоков тепла. Одна из задач экспедиции состояла в том, чтобы определить чувствительность потоков явного и скрытого тепла к залесенности территории. В качестве эталона открытого участка выступала вершина г. Ругозерской, а в качестве залесенной местности выступал участок елово-лиственничного леса, расположенный вблизи вершины г. Ругозерской. Потоки явного и скрытого тепла вычислялись моделью деятельного слоя суши ИВМ РАН (метод расчета потоков основан на теории Мони́на-Обухова).

В качестве входных параметров в модель использовались данные АМС и данные снегомерных съемок. Известно, что каждый ландшафт представлен своими характерными значениями плотности и высоты снега: они были получены при снегомерной съемке (п. 5.1) и были подставлены в модель в качестве начальных условий. Данные о поступающей суммарной солнечной радиации на открытом участке были измерены АМС, а суммарная радиация для залесенного участка считалась равной 70% от радиации, поступившей на открытую местность (по данным Выгодской для высоких широт при малой высоте солнца для елово-лиственничных лесов).

Характерный суточный ход потоков явного и скрытого тепла для открытого и залесенного участков территории представлен на рисунках 5.6 и 5.7. Как видно, *поток явного тепла* в течение суток принимает в основном отрицательные значения, как случае открытой местности, так и в случае покрытия территории елово-лиственничным лесом. Отрицательный поток тепла означает, что поток направлен от более теплой атмосферы к более холодной подстилающей поверхности. Ночью во время радиационного выхолаживания поток становится более отрицательным, а в период 13:00-15:00 (когда высота солнца максимальна) возможно появление слабоположительных значений потока явного тепла. При этом слабоположительные значения потока явного тепла в момент истинного полудня характерны только для открытой местности, где нагрев подстилающей поверхности приводит к смене знака потока. Положительные значения потока явного тепла означают, что тепло идет от подстилающей поверхности в атмосферу.

На территории, покрытой елово-лиственничным лесом, значения потока явного тепла всегда отрицательны (полог леса пропускает недостаточно солнечной радиации для нагрева подстилающей поверхности). При этом в ночные и вечерние часы значения потока H в лесу такие же, как и для открытой местности: отличия наблюдаются только во время светового дня (с 11:00 до 16:00). Эти «дневные» отличия довольно велики и могут достигать 10 Вт/м^2 .

Рассмотрим ход *потока скрытого тепла* в течение суток. Рисунки 5.6 и 5.7 дают понять, что характерные величины потока скрытого тепла, как правило, на порядок меньше значений потока явного тепла и большую часть суток колеблется около нуля. В течение суток он слабоположителен: это значит, что поток направлен от подстилающей поверхности в сторону атмосферы. Это, в свою очередь, свидетельствует о том, что подстилающая поверхность испаряет влагу и при этом охлаждается. Процесс испарения происходит более интенсивно днем на открытой местности (максимальные значения потока LE равны 5 Вт/м^2).



Рис 5.6. Характерный суточный ход потоков явного (H) и скрытого (LE) тепла для открытого участка местности



Рис 5.7. Характерный суточный ход потоков явного (H) и скрытого (LE) тепла для территории, покрытой елово-лиственничным лесом

Появление слабоотрицательных значений потока скрытого тепла может произойти в ночные часы, во время радиационного выхолаживания может происходить конденсация водяного пара, которая сопровождается выделением тепла, которое расходуется на нагрев верхнего слоя поверхности снега и контактирующего с ним воздуха.

Осредненные за период экспедиции значения потоков явного и скрытого тепла, характерные для открытой и залесенной местностей, представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2. Характерные для открытой и залесенной местностей значения потоков явного (H) и скрытого (LE) тепла

Ландшафт	H (Вт/м ²)	LE (Вт/м ²)
Открытая местность	-7.01	0.10
Елово-лиственничный лес	-7.95	-0.32

Помимо выявления зависимости потоков тепла от залесенности территории и вычисления их абсолютных значений для данного типа ландшафта, участниками экспедиции также была поставлена задача оценить влияние толщины снежного покрова на величины характеристик теплообмена применительно к открытой и залесенной местности.

С помощью модели ИВМ РАН были вычислены значения потоков явного и скрытого тепла для различной толщины снежного покрова. Анализ этих результатов (не приводятся ввиду ограниченности объема отчета) позволяет сделать вывод, что имеет зависимость величин потоков тепла от толщины снежного покрова, однако количественно он выражен не существенно. При увеличении толщины снежного покрова значения потоков, как явного, так и скрытого тепла, становятся более отрицательными. Это связано с тем, покрытая большим количеством снега подстилающая поверхность, более выхоложена (поток тепла от почвы уменьшается более мощным снежным покровом), а следовательно, поток от атмосферы к подстилающей поверхности является более отрицательным.

Имея в распоряжении данные снегомерных съемок на изучаемой территории, были построены гистограммы повторяемости высот снежного покрова, как для открытых местностей, так и для залесенных (п. 5.1). На их основе были рассчитаны повторяемости определенных значений потоков явного и скрытого тепла для открытой и залесенной местностей, а также средние потоки тепла с залесенных и открытых участков. Таким образом, впервые на основе сопряжения данных наблюдений и данных моделирования были получены значения характеристик теплообмена деятельного слоя суши с атмосферой для изучаемой территории для открытых участков и участков, покрытых лесом. Значения потоков явного и скрытого тепла, составили -7.95 Вт/м^2 и -0.32 Вт/м^2 соответственно для залесенных территорий, и -6.99 Вт/м^2 и 0.11 Вт/м^2 для открытых местностей.

Глава 6.

Моделирование мезомасштабной циркуляции над Белым морем.

6.1 Введение.

Представленная глава посвящена описанию численных экспериментов и описанию полученных результатов с прогностической региональной моделью WRF.

Качество прогноза погоды, рассчитанного на полярной версии модели WRF значительно лучше стандартного. Приведенное сравнение оценок в статье (Макштас и др, 2010).

В данной главе будут описаны условия проведенных численных расчетов метеорологических полей, оценка качества прогноза погоды. Для валидации модели использовались станционные данные, а также данные автоматических метеорологических станций (АМС), полученные в результате экспедиции.

6.2 Описание численных экспериментов.

Для получения модельных данных высокой пространственной дискретности были реализованы эксперименты с шагом в 1 километр на вложенной сетке, ограниченной координатами по широте 66 - 67 с.ш. и долготе 31,7 – 34 в.д.

Модель интегрировалась на 60 часов, выдача данных осуществлялась каждый час. Для валидации модели использовать данные не только данные АМС имеющих высокую дискретность, но и данные регулярных метеорологических станций. Подробно использованная конфигурация модели представлена в работе (1).

Оценке подверглись значения температуры на двух метрах, температуры поверхности, температуры точки россы, высоты снега, скорости и направления ветра на десяти метрах, численно рассчитанных моделью WRF.

В следующей таблице приведены оценки качества численных экспериментов модели с пространственным шагом 1км. Модель валидировалась по четырем пунктам наблюдений, 3

из которых составили автоматические метеорологические станции, установленные в рамках экспедиции и станция сети, расположенная в Кандалакше.

Таблица 6.1. Ошибки метеорологических полей, осредненные за экспедиционный период.

	Модуль средней ошибки	Средняя квадратическая ошибка	Модельная дисперсия	Станционная дисперсия
Температура на 2х метрах (С)	1.2	1.3	5.5	5.8
Температура поверхности (С)	5.7	6.8	7.2	7.9
Температура точки росы (С)	1,3	1.4	6.1	6.2
Высота снега (см)	17	19	35	57
Скорость ветра на 10 метрах (м/с)	1.4	2.1	7.1	7.2
Направление ветра на 10 м (градусы)	18	24	128	294

Из таблицы видно, что рассчитанные поля температуры воздуха, температуры точки росы и характеристик ветра обладают хорошим качеством. Рассчитанные показатели высоты снега и температуры поверхности оказались далеки от истины. Это связано с несовершенством параметризаций процессов в приземном слое.

На рисунке (6.1) представлено изменение температуры в точке автоматической метеорологической станции «База» и температуры рассчитанной в этой же точке моделью с 1 по 4 февраля сего года.

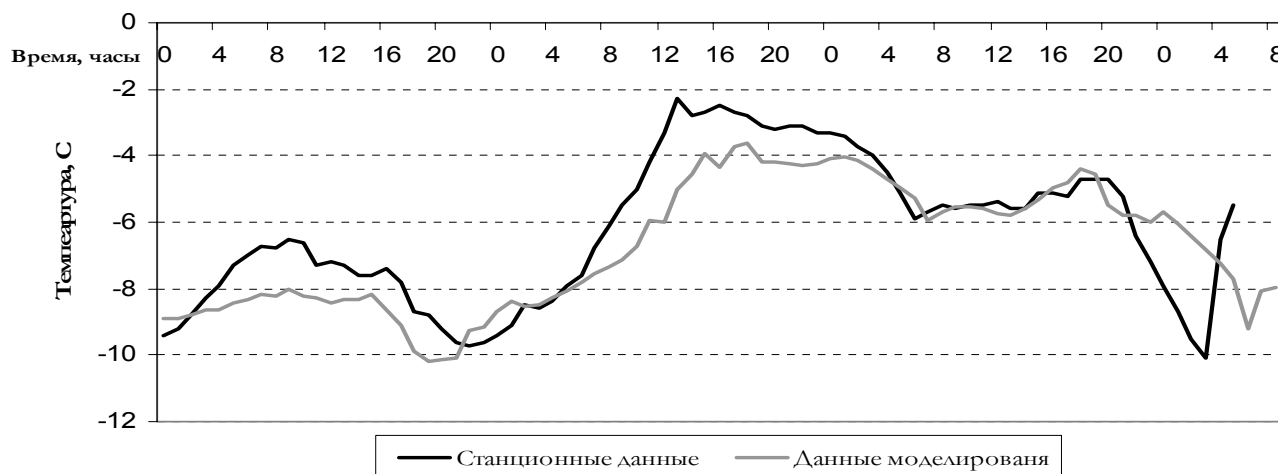


Рисунок 6.1. Рассчитанная моделью и наблюдавшаяся температура на 2х метрах.

6.3 Моделирование атмосферной циркуляции над ледовыми участками акватории.

Тепловой баланс поверхности сильно зависит от теплофизических свойств суши и снега (льда). Альbedo, влагосодержание, теплопроводность, температуропроводность определяют количество тепла приходящее и передающееся в системе воздух-поверхность. При работе с физически неоднородными территориями (наличие участков талой и замерзшей воды, заснеженных территорий) подробный учет различий в свойствах подстилающей поверхности может заметно улучшить качество работы модели.

Однако, модели подсылающей поверхности, содержащая информацию о теплофизических параметрах того или иного ландшафта, не всегда достаточно точна. Для оценки характеристик теплового взаимодействия деятельного слоя с атмосферой крайне важно иметь точные знания свойств поверхности.

Граничные условия модели предполагают, что на всей акватории Белого моря отсутствует ледяной покров. Однако это не так. Что бы исправить данную неточность данные были изменены – в поверхность воды был вписан участок льда (рис. 7.2).

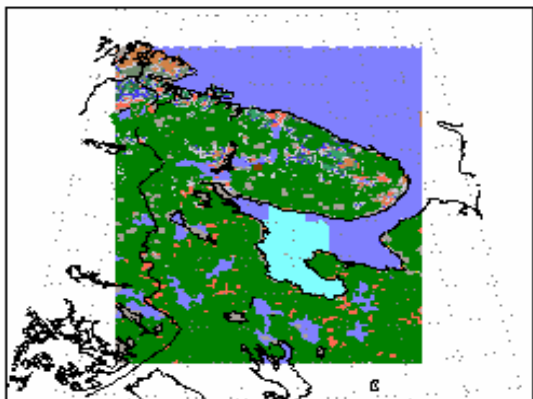


Рисунок 6.2. Типы поверхностей.

Центральная часть Белого моря и Онежская губа покрыты льдом. Произведенные изменения выполнены в соответствии с картами ледовой обстановки на Белом море в период экспедиции. Таким образом, физические свойства воды изменены на свойства льда (голубой участок). Кроме того, поскольку и в открытой воде присутствует ледяные скопления, то интегральные характеристики альбедо, уровня шероховатости и проч., такой поверхности удалены от свойств идеальной воды. Этот факт также был учтен в изменениях теплофизических свойств открытой воды. Все произведенные изменения представлены в таблице 6.2.

Таблица 6.2. Теплофизические свойства.

	Альбедо (%)	Влагосодержание (%)	Шероховатость (см)	Теплоёмкость
Лёд	80	95	5	0.05
Вода	8	100	0.01	0.06
Вода со льдом	30	98	0.5	0.06

Приближение к реально наблюдающимся типам ландшафта модельных граничных условий должно положительно сказаться на качестве прогноза. По стандартной методике были повторно произведены оценки температуры воздуха, поверхности и точки росы, полученные в ходе экспериментов с уточненной ландшафтной маской. Нехватка машинного времени не позволила провести повторные численные расчеты для всего экспедиционного периода, поэтому временные границы пришлось сузить до 48 часов.

Таблица 6.3. Ошибки метеорологических полей, осредненные за 26 и 27 января.

	Модуль средней ошибки		Средняя квадратическая ошибка		Модельная дисперсия		Станционная дисперсия
	Эталон	Новая версия	Эталон	Новая версия	Эталон	Новая версия	
Температура на 2х метрах (С)	3,2	2,9	3,8	3.8	17,4	19.1	26,7
Температура поверхности (С)	8,8	8.1	10,5	10.0	9,0	8.9	19,1
Температура точки росы (С)	3,6	3.5	4,7	4.5	20.3	23	25,8

Результаты оценок с заголовком «Эталон» принадлежат эталонному эксперименту без изменений свойств поверхности. Во всех случаях качество численного прогноза улучшилось. Дисперсии температуры почвы и воздуха приблизились к реальности.

Проведенные расчеты показали, что при уточнении теплофизических характеристик поверхности улучшается качество прогноза метеорологических полей на региональном уровне.

6.4 Выводы главы.

В данной главе представлены оценки точности расчетов модели прогноза погоды WRF.

Основная работа связана с уточнением теплофизических свойств подстилающей поверхности. В результате проведенных изменений в описании свойств, основанных на фактических картах ледовой обстановки, удалось улучшить качество метеорологических полей.

Заключение

В результате полевых и камеральных работ была проведена оценка характеристик теплообмена подстилающей поверхности с атмосферой в высоких широтах в условиях формирования мощного снежного покрова на суше и неоднородного ледового покрова.

Были получены **следующие выводы**:

- Исходя из взаимного расположения полуострова и полыньи, предполагалось, что наибольший отепляющий эффект должен возникать при северных и северо-восточных ветрах. В период экспедиции в северной части ЕТР преобладало южное направление фонового воздушного потока, и отепляющее влияние полыньи на территорию полуострова Киндо было практически не выражено, что показали микроклиматические наблюдения.
- Моделирование турбулентной конвекции над полыньей с помощью вихреразрешающей модели также показало, что при синоптических условиях, имевших место в период экспедиции, зафиксировать тепловой след полыньи доступными (и согласованными с Т.Б) способами измерения было невозможно. Но при смоделированных благоприятных синоптических условиях тепловой след проявился бы, согласно результатам моделирования, в увеличении средней температуры на побережье у Биостанции на $0,5^{\circ}\text{C}$. Таким образом применение данной модели оказалось оправданным.
- Разница в преобладающем направлении ветра на северном и южном побережье полуострова Киндо, а также на г. Ругозерская обусловлена особенностями рельефа территории и конфигурацией суши и воды.
- Сравнительно невысокая скорость ветра на г. Ругозерская определяется большей залесенностью подстилающей поверхности по сравнению с двумя другими точками наблюдений. Наиболее высокие скорости ветра характерны для станции, расположенной на северном побережье полуострова.
- По результатам использования модели водоема LAKE показано, что влияние полыньи в проливе Великая Салма на потоки тепла выражается в следующем: поток явного тепла меняет знак с отрицательного на положительный, а поток скрытого тепла и суммарный поток явного и скрытого тепла остаётся отрицательным, но становится меньше по модулю.
- На безлесных участках полуострова максимум вероятности высоты снега приходится на 34-55 см. Близкое к нормальному распределение высот снега объясняется разными значениями высот для литоралей, болот, поверхности скал. Для участков с растительностью характерными высотами являются 35-65 см (максимум вероятности- 45-50 см).
- Впервые в данном регионе, на основе сопряжения данных наблюдений и данных моделирования были получены значения характеристик теплообмена деятельного слоя суши с атмосферой для изучаемой территории для открытых участков и участков, покрытых лесом. Значения потоков явного и скрытого тепла, составили -7.95 Вт/м^2 и -0.32 Вт/м^2 соответственно для залесенных территорий, и -6.99 Вт/м^2 и 0.11 Вт/м^2 для открытых местностей.
- Расчеты, проведенные с помощью прогностической региональной модели WRF показали, что при уточнении распределения льда и открытой воды на поверхности Белого моря улучшается качество прогноза метеорологических полей на региональном уровне.

Благодарности

Участники и руководители Беломорской экспедиции НСО кафедры метеорологии и климатологии выражают искреннюю признательность:

- персоналу Беломорской Биологической станции МГУ и лично ее директору профессору Цетлину А.Б. и зав. станции Папунишвили Л.Д. за содействие в проведении экспедиции;
- Гидрометцентру России за предоставленные синоптические карты;
- студентке 5 курса кафедры геоморфологии и палеогеографии географического факультета МГУ Н.И. Косевич за предоставленные картографические материалы.
- сотрудникам кафедры океанологии географического факультета МГУ доц. Пантюлину А.В. и доц. Архипкину В.С. за поддержку, ценные советы в ходе подготовки экспедиции и данные АМС кафедры океанологии. А также будущему (как хочется верить) сотруднику той же кафедры Ф. Гиппиусу за помощь в своевременном получении этих данных;
- н.с. кафедры геоморфологии Репкиной Т.Ю. за помощь в подготовке экспедиции;
- н.с. НИЛ геоэкологии Севера Кузнецову Д.Е. за содействие в проведении экспедиции.
- а также всем остальным, кто помогал нам в эти незабываемые 12 дней.

Список литературы

1) Макштас А.П., Рубинштейн К.Г., Бычкова В.И., Игнатов Р.Ю (2010) Оценка качества воспроизведения метеорологических параметров в Арктическом районе полярной версией модели WRF. Метеорология и гидрология, в печати.

2) Мачульская Е.Е., В.Н. Лыкосов. Моделирование термодинамической реакции вечной мерзлоты на сезонные и межгодовые вариации атмосферных параметров. - Известия АН. Физика атмосферы и океана, 2002, т. 38, С. 20-33.

3) Степаненко В.М., В.Н. Лыкосов. Численное моделирование процессов тепловлагообмена в системе водоем - грунт. - Метеорология и гидрология, 2005, № 3, С. 95 - 104.

4) Glazunov A.V. , V.N. Lykosov. Large-eddy simulation of interaction of ocean and atmospheric boundary layers. - Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling, 2003, 18, pp. 279-295.