

На правах рукописи

Колмакова Мария Владимировна

**ГИДРОЛОГО-КЛИМАТИЧЕСКАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ В  
РЕЧНЫХ БАССЕЙНАХ ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ РАВНИНЫ  
(ПО ДАННЫМ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ, МОДЕЛЬНОГО  
РЕАНАЛИЗА И СПУТНИКОВОЙ АЛЬТИМЕТРИИ)**

Специальность: 25.00.36 – геоэкология (науки о Земле)

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук

Томск – 2012

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» на кафедре гидрологии и в Университете им. Поля Сабатье – Тулуза Ш, (г. Тулуза, Франция), в лаборатории по изучению геофизики и океанографии спутниковыми методами

**Научные руководители:** доктор географических наук, профессор  
**Земцов Валерий Алексеевич** (Россия)

кандидат географических наук, доцент  
**Кураев Алексей Вячеславович** (Франция)

**Официальные оппоненты:**

**Севастьянов Владимир Вениаминович**, доктор географических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», кафедра метеорологии и климатологии, профессор

**Савичев Олег Геннадьевич**, доктор географических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», кафедра гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии, профессор

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук, г. Барнаул

Защита состоится «17» декабря 2012 года в 12.30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.267.19, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина 36. ауд. 209.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Томского государственного университета.

Автореферат разослан 16 ноября 2012 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Савина Наталья Ивановна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы и состояние исследований.** Для прогноза будущих изменений климата требуются многолетние данные по климатическим и гидрологическим характеристикам, которые можно получать не только с помощью гидрометеорологических наблюдений на станциях, но и с помощью модельного реанализа и спутниковой альтиметрии.

Модельный реанализ представляет собой результат численного моделирования с ассимиляцией данных наземных и спутниковых наблюдений. Модельный реанализ широко используется разными научными группами в исследованиях по изменению климата, как в России, так и за рубежом (Serreze et al., 2005; Гордов, 2007). Реанализ ERA-40 на сегодняшний день считается одним из лучших источников информации для анализа климатических изменений.

Спутниковая альтиметрия является одним из активных методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Метод применяется для исследований поверхности океана (Fu, Cazenave, 2001), измерения точной топографии поверхностей, покрытых льдом в полярных областях (Legresy, Remy, 1997; Remy et al., 1999), для измерения уровня водных объектов суши (Birkett 1995, Cazenave et al. 1997), а в последнее время – для получения информации о режиме обводненности территорий (Zakharova, 2009). Последнее является очень важным при изучении гидрологии и геоэкологии Западно-Сибирской равнины, отличающейся сильной заболоченностью. Под степенью обводненности нами понимается относительная площадь покрытия территории постоянно или временно влагой (озера, реки, разного вида топи, речные поймы, болота). Она меняется в пространстве и во времени и отражает характер увлажнения территории. В диссертационной работе в расширение подхода В.С. Мезенцева и И.В. Карнацевича (1969) обводненность рассматривается нами как показатель степени увлажнения территории, определяемой по данным спутниковой альтиметрии.

Заболоченность Западной Сибири и редкая сеть пунктов гидрометеорологических наблюдений затрудняют мониторинг гидрологического режима. Привлечение данных модельного реанализа и спутниковой альтиметрии, обеспечивающих регулярное покрытие всей изучаемой территории Западно-Сибирской равнины, позволяет дополнить натурные наблюдения и значительно расширить область исследований, что и определяет актуальность настоящей работы.

**Целью работы** является оценка изменчивости тепловлагообеспеченности разных гидролого-климатических зон на территории Западной Сибири по данным метеорологических станций, модельного реанализа и спутниковой альтиметрии в связи с изменением климата.

**Задачи исследования:**

- провести анализ трендов годовых и сезонных температур воздуха и атмосферных осадков за многолетний период по данным модельного

реанализа ERA-40, отнесенным к речным бассейнам среднего размера, и данным метеорологических станций;

- применить данные спутниковой альтиметрии для оценки обводненности изучаемой территории, предварительно определив пороговое значение коэффициента обратного рассеяния (КОР) для каждого бассейна реки, позволяющее отделить обводненную поверхность от сухой;
- оценить временную (межгодовую и сезонную) изменчивость режима увлажнения речных водосборов, находящихся в разных ландшафтных зонах, методом спутниковой альтиметрии (1993-2008 гг.).

**Объекты исследования.** В качестве объектов исследования выбраны средние по площади речные бассейны, находящиеся в разных гидролого-климатических и болотных зонах Западной Сибири:

I. Зона избыточного увлажнения и недостаточной теплообеспеченности, зоны бугристых болот – водосборы рек Полуй, Надым, Пур, Таз.

II. Зона избыточного увлажнения и выпуклых олиготрофных болот – водосборы рек Северная Сосьва, Конда, Тавда, Казым, Назым, Лямин, Тромъеган, Вах, Большой Юган, Васюган, Тым, Кеть.

III. Зона преимущественно избыточного и достаточного на крайнем юге увлажнения и достаточной теплообеспеченности, соответствующая зоне плоских евтрофных и мезотрофных болот – водосборы рек Тура и Омь в ее верховьях.

IV. Зона недостаточного увлажнения и достаточной теплообеспеченности, зона вогнутых евтрофных и засоленных болот – здесь располагаются низовья бассейна реки Омь и области внутреннего стока (или бессточная область) Обь-Иртышского междуречья.

**Предмет исследования** – изменчивость показателей теплообеспеченности и обводненности речных бассейнов в разных гидролого-климатических зонах Западно-Сибирской равнины.

**Методы исследования.** В диссертации использован комплекс методов, таких как *спутниковая альтиметрия, картографический, статистический.*

**Исходный материал, используемый в работе.** Исходными данными для оценки климатической изменчивости по температуре воздуха и атмосферным осадкам послужили архивы 1) Всероссийского НИИ гидрометеорологической информации – Мирового центра данных (ВНИИГМИ-МЦД) по станциям Западной Сибири ([www.meteo.ru](http://www.meteo.ru)) и 2) модельного реанализа ERA-40 Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды ([www.ecmwf.int](http://www.ecmwf.int)).

Для оценки характера и изменчивости обводненности территорий водосборов рек использовались данные спутниковых альтиметров TOPEX/Poseidon и ENVISAT, полученные во французском центре наблюдений СТОН (<http://ctoh.legos.obs-mip.fr/> French Observation Service dedicated to satellite altimetry studies, г. Тулуза, Франция). В работе также использовались карта «Растительность Западно-Сибирской равнины», М 1:1500000 (1976); и гидрографические характеристики водосборов из

монографий (Ресурсы поверхностных вод..., 1978) и (Гидрология заболоченных территорий..., 2009).

**Научная новизна представленной работы** заключается:

- 1) в применении данных модельного реанализа ERA-40 по *речным бассейнам* (21 водосбор) для оценки изменчивости тепловлагообеспеченности территории;
- 2) использовании *данных спутниковой альтиметрии* для оценки пространственно-временной изменчивости обводненности речных бассейнов на основе анализа коэффициента обратного рассеяния (КОР), пороговые значения которого уточнены по гидрографическим характеристикам исследуемых водосборов;
- 3) выявлении связи между степенью обводненности и осадками летнего периода по данным модельного реанализа для ряда водосборов;
- 4) подтверждении репрезентативности данных спутниковой альтиметрии для оценки временной динамики обводненности речных бассейнов;
- 5) классификации речных водосборов Обского бассейна по характеру межгодового и сезонного хода коэффициента обводненности.

**Практическое значение работы и реализация результатов.** Диссертация выполнена в рамках международного российско-французского проекта **CAR-WET-SIB** «Биогеохимический цикл углерода в заболоченных ландшафтах Западной Сибири» при поддержке Посольства Франции, а также грантов РФФИ № 08-05-92496, № 11-05-93109.

Показано, как метод спутниковой альтиметрии можно использовать не только для измерений высоты поверхностей, но и для оценки сезонной и межгодовой изменчивости степени обводненности речных бассейнов.

Основные выводы и результаты работы используются при подготовке и преподавании курсов двух магистерских программ по направлению «гидрометеорология»: «гидрология суши», и «гидрология и геоэкология заболоченных нефтегазоносных территорий» в Томском государственном университете.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Данные модельного реанализа ERA-40 являются репрезентативным источником, позволяющим оценить изменчивость температуры воздуха и атмосферных осадков в *бассейнах рек* Западно-Сибирской равнины.
2. Метод спутниковой альтиметрии является репрезентативным источником информации, который позволяет оценивать относительную площадь обводненной поверхности в бассейнах рек и ее временную изменчивость.
3. Метод спутниковой альтиметрии позволяет проводить районирование территории по межгодовой и сезонной динамике обводненности бассейнов рек.

**Личный вклад автора.** Все основные результаты выполненных исследований были получены лично автором или при его активном участии. Выбор направления исследований, обсуждение результатов и формулировка

задач проводились совместно с научными руководителями В.А.Земцовым и А.В.Кураевым, а также с научным сотрудником лаборатории по изучению геофизики и океанографии спутниковыми методами в г. Тулуза Е.А.Захаровой. Основная обработка данных по спутниковой альтиметрии были проведены совместно с А.В.Кураевым и Е.А.Захаровой.

**Апробация результатов исследования.** Основные результаты обсуждались на международных и всероссийских конференциях: Европейского Геофизического Союза (European Geosciences Union, Вена, Австрия, 2009, 2010); Европейского Космического Агентства (ESA) «Спутниковые методы в гидрологии: комплексный подход в гидрологических исследованиях» («Earth observation and the water cycle: towards a water cycle multi-mission strategy») (Фраскати, Италия, 2009); Европейского Геофизического Союза «Леонардо» по актуальным проблемам водных ресурсов (EGU Leonardo Topical Conference Series on the hydrological cycle – 2010) (Люксембург, 2010); Enviromis-2010 (Томск, 2010); «Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов» (Барнаул, 2010); на трехстороннем российско-французско-немецком семинаре «Климато-регулирующая роль лесных и болотных экосистем: ландшафтно-экологические и социальные аспекты» (The climate regulating role of forest-bog ecosystems: landscape-ecological and social aspects) (Гамбург, Германия, 2010), Международной научно-практической конференции «Климатология и гляциология Сибири» (Томск, 2012).

По материалам диссертации опубликовано 5 статей, включая 2 – в журналах, которые входят в перечень рецензируемых научных журналов и изданий.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы, состоящего из 160 наименований, в том числе 60 на иностранном языке. Работа содержит 119 страниц печатного текста, 28 рисунков и 11 таблиц. Все таблицы и фотографии, если в подписи к ним не указано другое, выполнены автором.

**Благодарности.** Автор выражает искреннюю благодарность своим руководителям В.А.Земцову и А.В.Кураеву, а также соавторам публикаций Е.А.Захаровой, С.Н.Кирпотину, Н.М.Моньяр за идеи, консультации и помощь при написании работы.

Особую благодарность автор выражает доценту кафедры метеорологии и климатологии ТГУ И.В.Кужевской, сотруднику лаборатории по изучению геофизики и океанографии спутниковыми методами в г.Тулуза С.Бьянкамария за помощь в подготовке и анализе данных по климату, а также аспиранту ТГУ Р.М.Манассыпову за помощь в проведении полевых исследований.

Отдельное спасибо автор выражает всем организациям, которые предоставили финансирование для выполнения данной работы: Посольству Франции в Москве, Томскому государственному университету, Университету им. Поля Сабатье – Тулуза III, РФФИ, лаборатории по изучению геофизики и океанографии спутниковыми методами (LEGOS, г. Тулуза, Франция). Автор искренне благодарит сотрудников и аспирантов лаборатории LEGOS, а также

региональное образовательное учреждение г.Тулузы (CROUS) за моральную поддержку и помощь во время пребывания во Франции.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во введении обосновывается актуальность проблемы, сформулированы цель и основные задачи исследования, его научная новизна и практическая значимость.

### **Глава 1. Общая характеристика территории**

В главе рассмотрены физико-географические факторы и закономерности, которые определили развитие исследуемой территории. Характеризуются особенности климата, гидрографической сети, гидрологических условий, динамика болотообразовательного процесса, которые необходимо учитывать при геоэкологическом мониторинге территории.

### **Глава 2. Методология исследования**

В качестве исходной информации для оценки характера климатической изменчивости по температуре воздуха и атмосферным осадкам послужили данные наблюдений метеостанций и модельного реанализа ERA-40. наблюдения на метеостанциях использованы нами для контроля данных модельного реанализа.

Анализ данных по температуре воздуха и атмосферным осадкам проводился по станциям Березово (1936-2005 гг., 69 лет наблюдений) и Барабинск (1926-2005гг., 79 лет), расположенных в разных частях равнины. Данные по осадкам откорректированы в ВНИИГМИ-МЦД для исключения неоднородностей.

Архив реанализа ERA-40 содержит данные по температуре воздуха и атмосферным осадкам за период 1958-2001 гг. с пространственным разрешением  $2,5^{\circ}$  по широте и долготе в узлах регулярной сетки. Нами выполнено арифметическое осреднение данных во всех узлах регулярной сетки, попадающих в пределы каждого конкретного водосбора (рис. 1).

Анализ среднегодовой температуры воздуха и суммы атмосферных осадков в речных бассейнах проводился за календарный год и по сезонам, с условно принятыми жесткими границами: зима (декабрь предыдущего года – февраль, д-ф), весна (март-май, м-м), лето (июнь-август, и-а), осень (сентябрь-ноябрь, с-н). Уровень значимости  $\alpha$  при оценке статистической значимости параметров тренда по критерию Стьюдента задавался равным 5%.



**В.** зона избыточного увлажнения и недостаточной теплообеспеченности во влажный год повторяемостью 1 раз в 5 лет и оптимального увлажнения в средний год и сухой год повторяемостью 1 раз в 5 лет;

**С.** зона оптимального увлажнения и теплообеспеченности в средний год и во влажный год повторяемостью 1 раз в 5 лет и недостаточного увлажнения в сухой год повторяемостью 1 раз в 5 лет;

**Д.** зона недостаточного увлажнения и избыточной теплообеспеченности в сухой год повторяемостью 1 раз в 5 лет и оптимального увлажнения в средний год и во влажный год повторяемостью 1 раз в 5 лет;

**Е.** зона весьма недостаточного увлажнения и избыточной теплообеспеченности в средний год и сухой год повторяемостью 1 раз в 5 лет, а также недостаточного увлажнения во влажный год повторяемостью 1 раз в 5 лет;

**А1.** зона весьма избыточного увлажнения и недостаточной теплообеспеченности;

**Е1.** зона весьма недостаточного увлажнения и избыточной теплообеспеченности.

**Природные зоны (Булатов, 1996):**

1. тундра; 2. лесотундра; 3. северная и средняя тайга; 4. южная тайга; 5. подтайга (смешанные леса); 6. мелколиственные леса; 7. северная лесостепь; 8. центральная лесостепь; 9. южная лесостепь; 10. степь.

Для оценки режима увлажнения территории по обводненности водосборов нами использован метод спутниковой альтиметрии. Принцип его работы заключается в том, что радар альтиметра испускает короткий сигнал в направлении надира (вертикально вниз), сигнал отражается от земной поверхности и принимается бортовым приемником. Время от начала отражения сигнала до его приема позволяет установить расстояние между спутником и земной поверхностью.

С помощью альтиметрии получают расстояние между спутником и отражающей поверхностью, а также форму волны, которая несет информацию о природе и свойствах поверхности (Vignudelli et al., 2011). Одним из элементов формы волны является энергия альтиметрического сигнала, которая выражается *коэффициентом обратного рассеяния (КОР, дБ)* и используется в диссертации для анализа обводненности водосборов.

Открытая водная поверхность дает большее значение КОР, чем неувлажненная. Величина КОР зависит также от рельефа, почвогрунтов, растительности. В случае открытой водной поверхности сигнал сильный:  $КОР \geq 15$  дБ. Отраженный сигнал слабее, например, в горах с большим разнообразием уклонов поверхностей, от которых отражение происходит под разными углами с большими потерями энергии, а также на поросших густой травой суходольных лугах или, тем более, в лесу.

В диссертации использованы данные спутниковых альтиметров TOPEX/Poseidon и ENVISAT. Интервал повторения измерений (цикл) вдоль

спутниковой трассы составляет 10 и 35 дней соответственно. Зона покрытия спутниковыми трассами (треками) находится между  $66^{\circ}$  с.ш. и  $66^{\circ}$  ю.ш. у TOPEX/Poseidon и  $82,4^{\circ}$  с.ш. и  $82,4^{\circ}$  ю.ш. у ENVISAT (рис. 2).

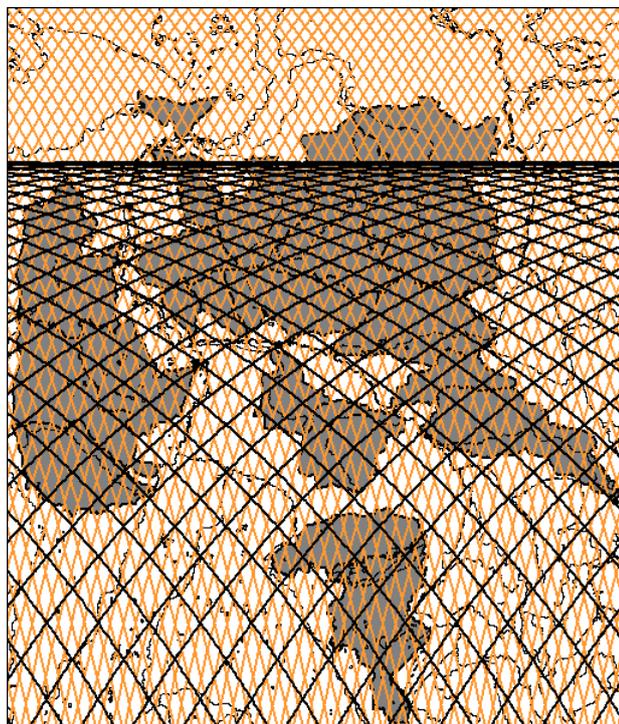


Рисунок 2 – Карта-схема покрытия водосборов трассами спутников TOPEX/Poseidon и ENVISAT

*Примечание: треки TOPEX/Poseidon показаны черным цветом, ENVISAT – оранжевым цветом*

### **Методика обработки спутниковых данных**

1. Данные альтиметрии представляли собой совокупность сигналов с интервалом вдоль спутниковой трассы 0,1 с, что соответствует пространственному разрешению 580 м для спутника TOPEX/Poseidon и 380 м для ENVISAT. Расстояние между спутниковыми трассами для TOPEX/Poseidon составляет 300 км и 85 км для ENVISAT (рис. 3). Точки вдоль трассы соответствуют сигналам спутника. Для получения выходных данных для дальнейшего анализа обводненности территории каждого водосбора с помощью программы ГИС MapInfo мы определяли координаты пересечения границ водосбора со спутниковыми трассами.

2. Определялось общее количество альтиметрических измерений в каждом цикле и количество измерений из них, приходящихся на поверхность, классифицируемую нами как водная, и на самом деле являющуюся в той или иной степени обводненной. На ней постоянно (в виде рек, озер) или временно (в виде разного типа болот, топей, речных пойм) присутствует вода. Обводненность территории предлагается измерять коэффициентом обводненности  $K_{обв}$ , вычисляемым как отношение количества измерений над

водной поверхностью  $Nobs_{(ndB)}$  к общему количеству измерений  $Nobs$  в каждом спутниковом цикле:

$$K_{обв} = Nobs_{(ndB)} / Nobs * 100\% \quad (1)$$

При этом пороговые значения коэффициента обратного рассеяния, позволяющие отделить обводненную поверхность от необводненной, задавались для каждого водосбора последовательно от 15 до 27 дБ (рис. 4). По формуле (1) для летнего наиболее сухого сезона у каждого бассейна вычислялся наименьший коэффициент обводненности  $K_{обв}$ , который для уточнения порогового значения КОР сравнивался с гидрографическими характеристиками этого водосбора, а именно, с относительной площадью постоянно увлажненных земель на водосборе, или суммой его озерности и заболоченности ( $f_{оз} + f_{б}$ ), взятых из монографий «Ресурсы поверхностных вод...», 1978) и «Гидрология заболоченных территорий» (2009), и по карте «Растительность Западно-Сибирской равнины» (1976).

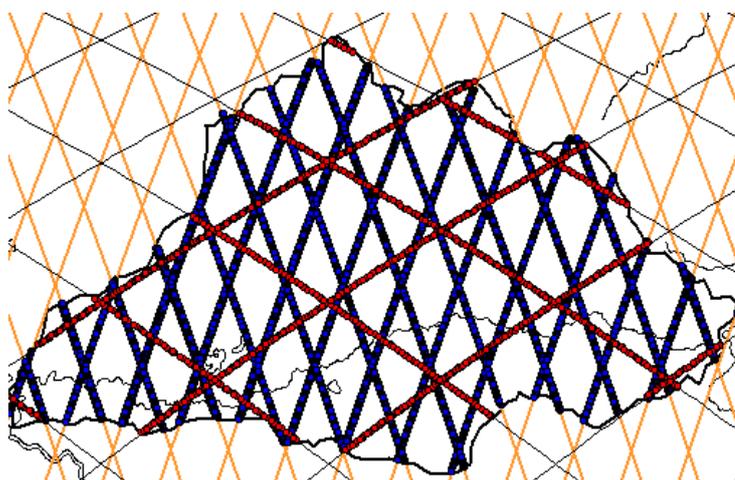


Рисунок 3 – Карта-схема покрытия водосбора реки Вах сигналами спутников TOPEX/Poseidon и ENVISAT

*Примечание: TOPEX/Poseidon – красный цвет, ENVISAT – синий цвет*

На рис. 4 представлен ход наименьших летних  $K_{обв}$  (%) в зависимости от принятого порогового значения КОР для бассейна р. Вах по данным двух спутников. Из него следует, что для TOPEX/Poseidon пороговое значение (соответствующее сумме заболоченности и озерности по гидрографическим характеристикам) равно 25 дБ, а для ENVISAT – 17 дБ. Полученные значения использовались далее для оценки динамики обводненности исследуемой территории.

Количество измерений  $Nobs$  за 10-дневный для TOPEX/Poseidon (49-753 точек) и 35-дневный для ENVISAT (1261-18509 точек) спутниковые циклы зависит от площади каждого водосбора. Очевидно, что величина  $K_{обв}$  изменяется во времени по сезонам года, а для каждого сезона – и в многолетнем разрезе, и отражает пространственно-временную динамику обводненности исследуемой территории.

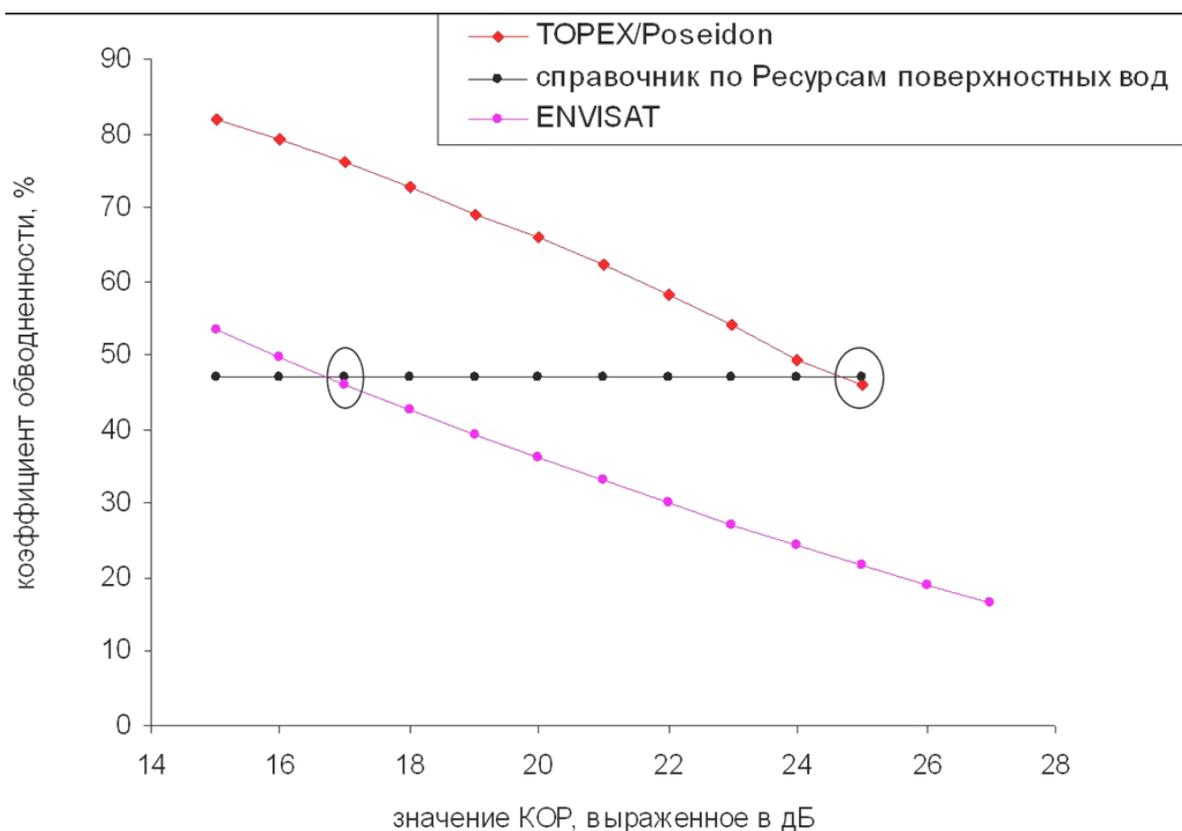


Рисунок 4 – График хода коэффициента обводненности (%) в зависимости от порогового значения КОР (дБ) для р. Вах со схемой определения порогового значения КОР

### Глава 3. Анализ пространственно-временной изменчивости климата и обводненности речных бассейнов Западной Сибири

Временная динамика температуры воздуха и атмосферных осадков в 21 исследуемом бассейне анализировалась нами по данным метеостанций (1926-2005 гг.) и модельного реанализа ERA-40 (1958-2001 гг.).

#### Исследование репрезентативности данных реанализа

Данные реанализа ERA-40 по температуре воздуха и осадкам сопоставлены нами с наблюдениями на станциях Березово и Барабинск для оценки репрезентативности. Анализ трендов температуры воздуха и атмосферных осадков за период 1958-2001 гг. на исследуемых водосборах показал хорошее соответствие данных метеостанций и реанализа (табл.1).

#### Исследование многолетних трендов изменения температуры и осадков

Исследование трендов среднегодовой температуры воздуха показало, что наиболее сильное потепление наблюдается в северной части равнины (коэффициенты линейных трендов от 0,35 до 0,37 °C/10 лет - табл. 2 и рис. 5а). Это подтверждается также результатами других авторов (Кабанов, 2008; Frey and Smith, 2003). Значимое увеличение атмосферных осадков в основном наблюдается в Зауралье на водосборах рек Северная Сосьва, Конда, Тавда,

Тура, на станции Березово, а также в северной части равнины на водосборе реки Таз и в Сургутском Полесье на водосборах рек Назым, Вах (16,8-24,1 мм/10 лет) (рис. 5б, табл. 3).

Таблица 1 – Значения коэффициентов линейного тренда и парных коэффициентов корреляции между данными реанализа и метеорологическими станциями по среднегодовой температуре воздуха и годовым осадкам за период 1958-2001 гг.

	Коэффициент линейного тренда ( $^{\circ}\text{C}/10$ лет)/(мм/10 лет)	$r_{xy}$ (температура)	$r_{xy}$ (осадки)
Реанализ (С. Сосьва)	0,2 /15	0,99	0,77
Березово	0,2 /10		
Реанализ (область замкнутого стока Обь-Иртышского междуречья)	0,3 /9	0,97	0,73
Барабинск	0,4 /13		

Для выявления роли каждого сезона в формировании поля среднегодовых температур воздуха и сумм атмосферных осадков также рассчитаны их тренды за отдельные сезоны: зима, весна, лето, осень. Наибольшие изменения температуры и осадков на водосборах происходят весной (табл. 2-3). Полученные нами результаты по температуре воздуха подтверждаются данными исследований авторов (Frey and Smith, 2003; Гордов, 2007) по данным метеостанций (1958-1999 гг.) и модельного реанализа ERA-40 (1958-2000 гг.).

Меньший вклад в изменение среднегодовых температур воздуха вносят температуры зимнего, летнего и осеннего сезонов на всех водосборах (за исключением станции Барабинск, на которой наблюдается значимое увеличение зимней температуры воздуха  $0,53^{\circ}\text{C}/10$  лет). Изменение атмосферных осадков менее существенно в летний и осенний сезоны, за исключением ряда водосборов, на которых наблюдается их значимое увеличение (табл. 3).

Значимое увеличение весенних температур приводит к более раннему снеготаянию и увеличению продолжительности вегетационного периода, а атмосферных осадков – к увеличению обводненности территорий в разных природных зонах (несмотря на рост температур воздуха и величины испарения). Обводненность территории зависит и от степени естественной дренированности территории. В таких условиях влияние изменения осадков на изменение режима обводненности сложно отследить только наблюдениями на станциях, а недоступность большинства территорий равнины еще больше усложняет решение этой задачи. Поэтому здесь оказывается полезным метод спутниковой альтиметрии.

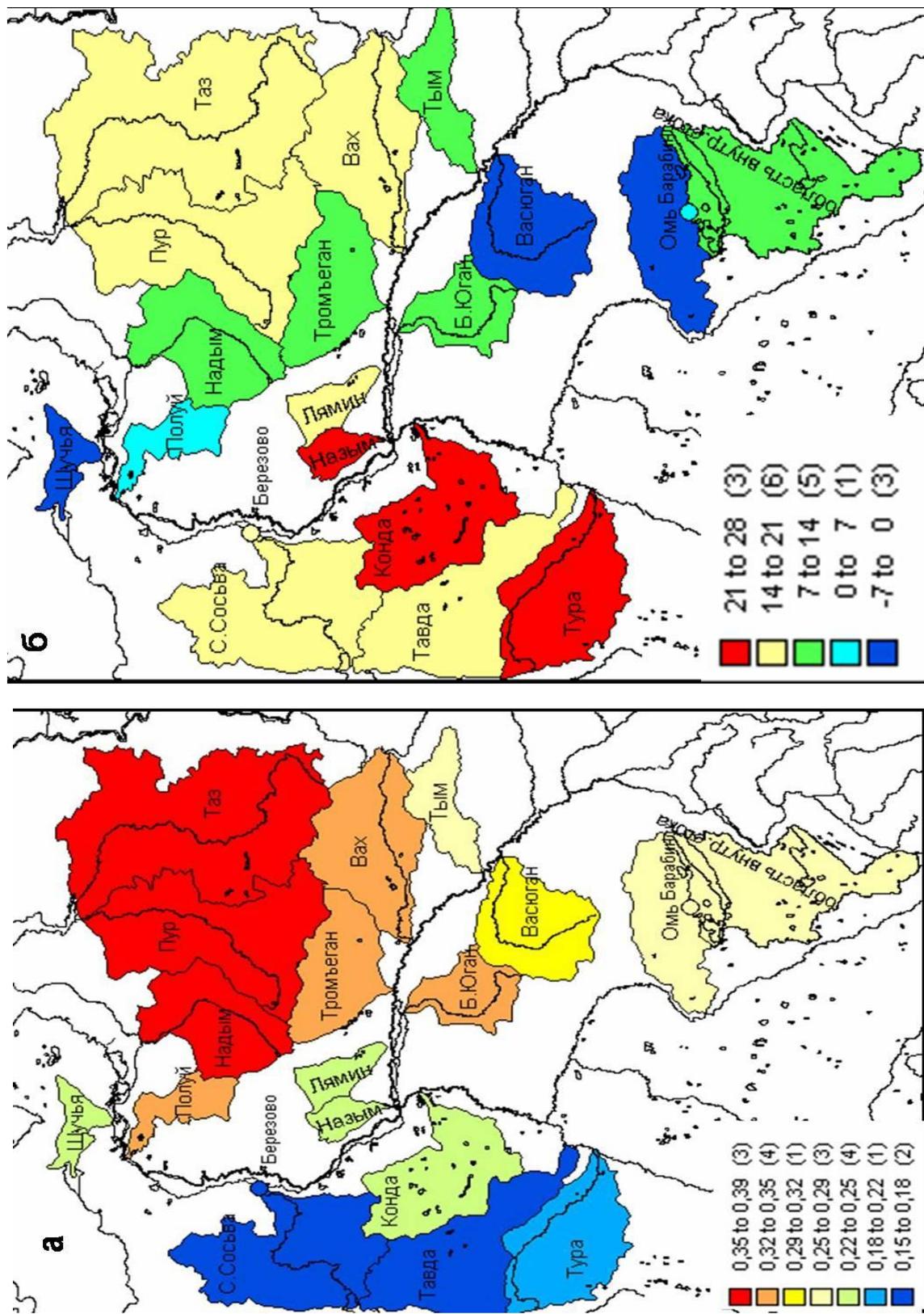


Рисунок 5 – Карта-схема распределения коэффициентов линейных трендов по (а) среднегодовой и (б) годовой сумме атмосферных осадков

Таблица 2 – Средние многолетние и сезонные значения коэффициентов линейного тренда по температуре воздуха и расчет t-статистики (1958–2001 гг. по ERA-40; 1926-2005 по метеорологическим станциям)

Названия водосборов и метеорологических станций	Среднегод. тренд, °C/10 лет	t-статистика	Тренд (д-ф), °C/10 лет	t-статистика	Тренд (м-м), °C/10 лет	t-статистика	Тренд (и-а), °C/10	t-статистика	Тренд (с-н), °C/10	t-статистика
Щучья	0,24	1,43	-0,10	-0,26	<b>0,84</b>	2,69	0,27	1,61	-0,11	-0,36
Полуй	<b>0,34</b>	2,12	0,12	0,29	<b>0,78</b>	2,72	0,29	1,83	0,12	0,49
Надым	<b>0,37</b>	2,29	0,23	0,55	<b>0,76</b>	2,71	0,29	1,97	0,12	0,46
Пур	<b>0,35</b>	2,20	0,22	0,47	<b>0,68</b>	2,52	<b>0,32</b>	2,25	0,23	0,87
Газ	<b>0,36</b>	2,32	0,34	0,71	<b>0,62</b>	2,47	0,25	1,78	0,12	0,42
Северная Сосьва	0,15	0,97	-0,05	-0,14	<b>0,53</b>	2,23	0,15	0,89	-0,07	-0,32
Конда	0,22	1,65	0,19	0,53	<b>0,45</b>	2,07	0,17	1,06	0,02	0,10
Тавда	0,17	1,31	0,01	0,17	<b>0,44</b>	2,14	0,18	1,15	-0,04	-0,19
Тура	0,20	1,73	0,22	0,72	0,33	1,66	0,18	1,20	0,05	0,30
Назым	0,22	1,53	0,09	0,24	<b>0,56</b>	2,26	0,17	1,11	0,03	0,11
Лямин	0,24	1,89	0,15	0,40	<b>0,63</b>	2,42	0,19	1,29	0,09	0,39
Тромъеган	<b>0,34</b>	2,24	0,26	0,63	<b>0,72</b>	2,50	0,19	1,36	0,12	0,47
Вах	<b>0,33</b>	2,14	0,32	0,70	<b>0,61</b>	2,52	0,24	1,73	-0,03	-0,10
Большой Юган	<b>0,33</b>	2,41	0,36	0,94	<b>0,59</b>	2,49	0,22	1,60	0,11	0,52
Тым	0,26	1,84	0,29	0,70	<b>0,53</b>	2,40	0,12	1,08	0,07	0,29
Васюган	<b>0,29</b>	2,21	0,30	0,83	<b>0,49</b>	2,34	0,19	1,62	0,09	0,46
Омь	<b>0,28</b>	2,02	0,34	0,98	0,38	1,71	0,17	1,32	0,11	0,58
область замк. стока Обь-Иртышского Междуречья	<b>0,27</b>	2,14	0,43	1,26	0,37	1,79	0,11	1,0	0,15	0,75
Березово	0,05	0,73	0,02	0,10	0,20	1,22	0,03	0,45	-0,04	-0,28
Барабинск	<b>0,26</b>	5,98	<b>0,53</b>	4,00	<b>0,40</b>	4,73	0,06	1,29	0,10	1,33

Примечание – жирным шрифтом обозначены значимые при  $\alpha = 0,05$  коэффициенты тренд

Таблица 3 – Средние многолетние и сезонные значения коэффициентов линейного тренда по атмосферным осадкам и расчет t-статистики (1958-2001 гг. по ERA-40; 1926-2005 по метеорологическим станциям)

Названия водосборов и метеорологических станций	Среднегод. тренд, мм/10 лет	t-статистика	Тренд (д-ф), мм/10 лет	t-статистика	Тренд (м-м), мм/10 лет	t-статистика	Тренд (и-а), мм/10 лет	t-статистика	Тренд (с-н), мм/10 лет	t-статистика
Щучья	-1,5	-0,20	2,5	1,2	1,7	0,59	-1,8	-0,31	-4,0	-1,09
Полуй	5,1	0,55	4,0	1,74	5,4	1,76	-1,2	-0,19	-2,9	-0,77
Надым	7,1	0,86	3,4	1,43	<b>5,1</b>	2,05	2,8	0,52	-4,5	-1,15
Пур	14,0	1,83	3,6	1,38	<b>6,2</b>	2,55	7,9	1,51	-4,0	-0,95
Таз	<b>20,1</b>	2,80	4,9	1,69	<b>7,6</b>	3,20	<b>8,6</b>	2,31	-0,9	-0,21
Северная Сосьва	<b>16,8</b>	2,43	0,8	0,43	5,6	1,82	<b>9,7</b>	2,32	0,3	0,08
Конда	<b>22,8</b>	2,52	<b>5,8</b>	2,54	<b>6,1</b>	2,21	6,9	1,11	3,5	1,05
Тавда	<b>19,9</b>	2,19	0,3	0,11	1,5	0,44	9,5	1,50	8,0	1,96
Тура	<b>24,1</b>	2,80	4,1	1,57	<b>5,8</b>	2,06	5,3	0,93	<b>8,8</b>	2,48
Назым	<b>23,9</b>	2,56	<b>4,0</b>	2,20	<b>9,5</b>	2,61	<b>14,8</b>	2,73	-5,0	-1,24
Лямин	16,2	1,63	<b>4,7</b>	2,31	<b>9,9</b>	2,80	7,3	1,23	-6,3	-1,51
Тромъеган	12,9	1,40	3,8	1,72	<b>6,4</b>	2,02	6,8	1,24	-4,7	-1,20
Вах	<b>20,8</b>	2,26	3,8	1,56	<b>8,4</b>	2,93	9,7	1,63	-1,7	-0,42
Большой Юган	12,1	1,00	2,1	0,19	<b>6,7</b>	2,21	2,3	0,36	0,5	0,15
Тым	11,7	1,45	3,2	1,39	3,3	1,02	4,7	0,88	0,1	0,03
Васюган	-1,6	-0,21	3,1	1,27	-0,7	-0,26	-3,9	-0,7	-0,6	-0,19
Омь	-6,9	-0,91	2,6	1,14	-0,7	-0,31	-10,1	-1,76	0,7	0,20
область замк. стока Обь-Иртыш. междуречья	9,5	1,34	3,0	1,28	1,0	0,40	5,2	1,22	-0,2	-0,06
Березово	<b>19,8</b>	3,91	<b>6,4</b>	5,25	<b>5,4</b>	2,92	2,1	0,58	4,5	1,81
Барабинск	4,3	1,27	<b>4,3</b>	4,54	0,9	0,71	-1,8	-0,66	1,1	0,87

Примечание – жирным шрифтом обозначены значимые при  $\alpha = 0,05$  коэффициенты тренда

## Исследование динамики обводненности методом спутниковой альтиметрии

Анализ временной изменчивости обводненности в речных бассейнах вначале проводился по данным спутника TOPEX/Poseidon, а затем – спутника ENVISAT.

Выполнена классификация речных бассейнов (TOPEX/Poseidon) по характеру межгодового хода минимальных коэффициентов обводненности за летний сезон. В результате автором на основе визуального анализа изменчивости минимальных летних коэффициентов обводненности за 8 лет выделены четыре географических района (рис. 6). Первый из них включает центральную часть Обь-Иртышского междуречья и его бессточную область. Вторым районом объединяет реки Зауралья и северной части Обь-Иртышского междуречья. В этой группе рек выделяются 2 подгруппы: а) Северная Сосьва, Конда, Тавда; б) Тура и Большой Юган. В третьем районе оказались реки Обь-Енисейского междуречья, а в четвертом – реки Сургутского Полесья, а также реки текущие к северу от Сибирских Увалов. В последнем районе выделяется 4 подгруппы водосборов: а) Пур, Надым, Казым; б) Полуй, Таз; в) Тромъеган, Пим; г) Лямин, Назым. Предложенная классификация водосборов хорошо согласуется с классификацией В.А.Земцова (2003) по сходству многолетней изменчивости годового и помесечного стока рек, однако группа рек, текущих к северу от Сибирских Увалов, подразделяется нами более детально.

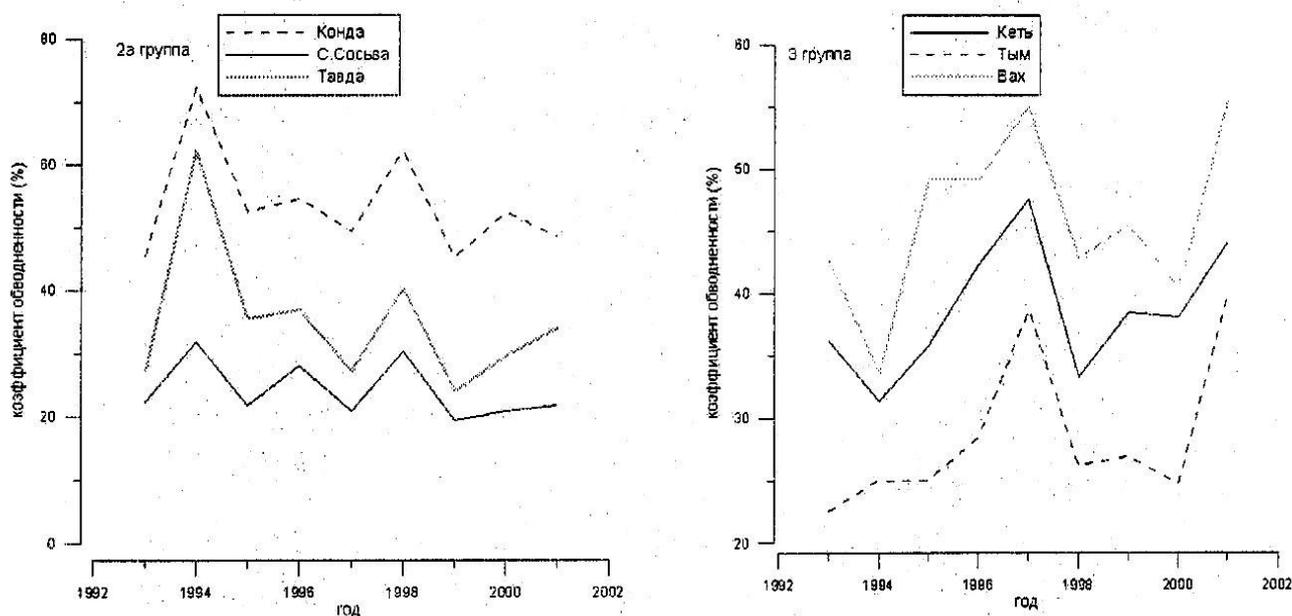


Рисунок 6 – Группы водосборов по межгодовому ходу коэффициента обводненности

Для выявления зависимости между минимальной обводненностью летнего периода и суммой осадков за этот период вычислены коэффициенты парной линейной корреляции и их стандартные погрешности на всех исследуемых водосборах. Значимые коэффициенты корреляции  $\alpha = 0,05$  получены для рек Сев. Сосьва ( $r_{xy} = 0,79$ ) Тым ( $r_{xy} = 0,90$ ), Омь ( $r_{xy} = 0,93$ ), Васюган ( $r_{xy} = 0,73$ ), Полуй ( $r_{xy}$

= 0,77). Таким образом, можно предположить, что минимальная обводненность бассейнов существенно зависит от суммы осадков летнего периода, что подтверждает репрезентативность данных альтиметрии.

Данные альтиметра TOPEX/Poseidon, охватывающие только 8-летний период наблюдений, не позволили выявить значимые временные тренды. Исключение составили только водосбор реки Омь и область внутреннего стока Обь-Иртышского междуречья с отрицательным трендом осадков. Однако в работе О.С.Литвиновой (2011) на территории Обь-Иртышского междуречья не выявлен значимый тренд в колебаниях годовой суммы осадков за последние 70 лет. Вероятно, это связано с различиями в длинах временных рядов. Можно утверждать только то, что и в дальнейшем будут происходить как колебания, так и направленные изменения обводненности территорий, а метод спутниковой альтиметрии вполне может использоваться для оценки динамики обводненности водосборов.

Анализ изменчивости обводненности всех исследуемых речных бассейнов по данным альтиметра *ENVISAT* проводился для 2003-2008 гг. (5 лет). На первом этапе мы работали с бассейнами севера Западной Сибири: Полуй, Надым, Пура, Таз (ПНПТ), используя пороговое значение  $KOP=20$  дБ. Результаты представлены на рис. 7, они отражают изменчивость обводненности водосборов ПНПТ, характеризующуюся наличием ежегодно двух максимумов: весеннего и осеннего, с минимумом между ними. Первый из них связан с весенним половодьем, которое наступает обычно в июне, со значением  $K_{обв}$  до 85% для всех рек, кроме Таза (66%). Низкое значение  $K_{обв}$  в бассейне р. Таз, вероятно, объясняется расчлененным рельефом Тазовской возвышенности, где условия затопления менее благоприятны.

Второй максимум приурочен к осенним паводкам в сентябре, также с высокими значениями  $K_{обв}$  – до 81% для Надыма, 79% для Пура, 56% для Полуя и 52% для Таза. Отметим, что весенний и летне-осенний периоды характеризуются почти одинаково высокими значениями обводненности, хотя водность рек существенно ниже в летне-осенние паводки, чем в половодье, т.е. даже незначительное повышение разности осадков и испарения на водосборе ведет к существенному обводнению поверхности и увеличению влажности почвы.

Летний минимум у всех бассейнов наблюдается в августе со значениями  $K_{обв}$  35% для Полуя, 68% для Надыма, 70% для Пура и 42% для Таза. Таким образом, спутниковая альтиметрия дала возможность оценить величину и изменчивость площади затопляемых и переувлажненных территорий на водосборах ПНПТ.

Классификация 21 водосбора по сезонному ходу коэффициента обводненности при пороговом значении  $KOP=20$  дБ показана в табл. 4.

Поскольку пороговое значение  $KOP$  зависит от типа ландшафта, мы выбирали индивидуальное значение этого критерия для каждого водосбора. Для северных водосборов пороговое значение осталось неизменным (20 дБ). Водосборы, находящиеся в области Зауралья, в центральной части Обь-Иртышского междуречья и его бессточной области, а также в районе Сургутского Полесья, характеризуются другими пороговыми значениями  $KOP$ .

В результате проведенного анализа межгодовой изменчивости обводненности также удалось выделить четыре географических района, которые в целом совпадают с районами, установленными по данным спутника TOPEX/Poseidon. При этом со временем также наблюдается постепенное увеличение обводненности в каждом географическом районе (рис. 8).

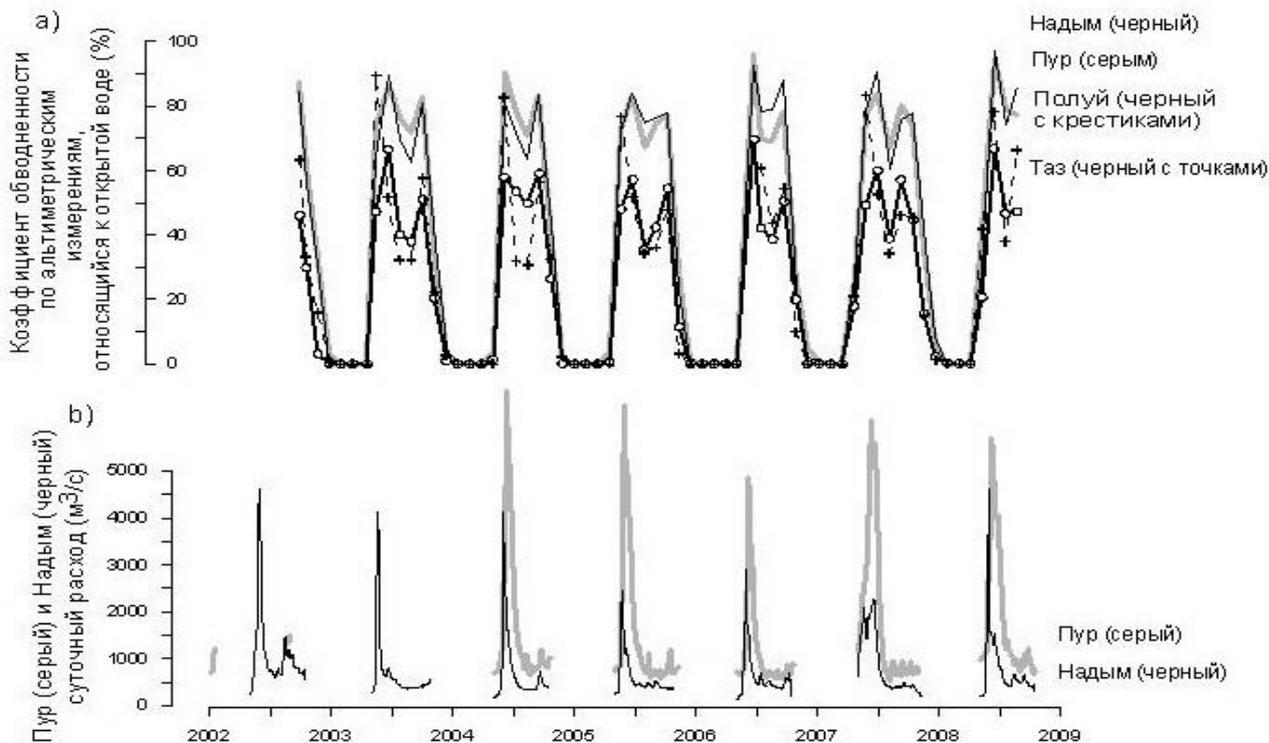


Рисунок 7 – Временная изменчивость (а)  $K_{обв}$  (измерения альтиметрического спутника ENVISAT, классифицированные как вода, (%); (б) гидрографы стока рек,  $m^3/c$  (Zhakharova et al., 2009)

Таблица 4 – Типы водосборов по межгодовой и сезонной изменчивости по данным спутника ENVISAT (Zakharova et al., 2009)

Типы и характеристика водосборов по сезонной изменчивости $K_{обв}$
I. Низкое продолжительное половодье с одним пиком и хорошо выраженным летним минимумом: область внутреннего стока Обь-Иртышского междуречья, Омь, Тавда, Северная Сосьва, Тура, Васюган.
Ia. Низкое продолжительное половодье с двумя пиками и хорошо выраженным летним минимумом: Кеть, Тым, Большой Юган и Конда.
II. Высокое продолжительное половодье с незначительным летним минимумом: Тромъеган, Пим, Лямин, Назым, Щучья
III. Среднее продолжительное половодье с двумя пиками и хорошо выраженным летним минимумом: Вах, Казым, Таз, Полуй, Пур, Надым

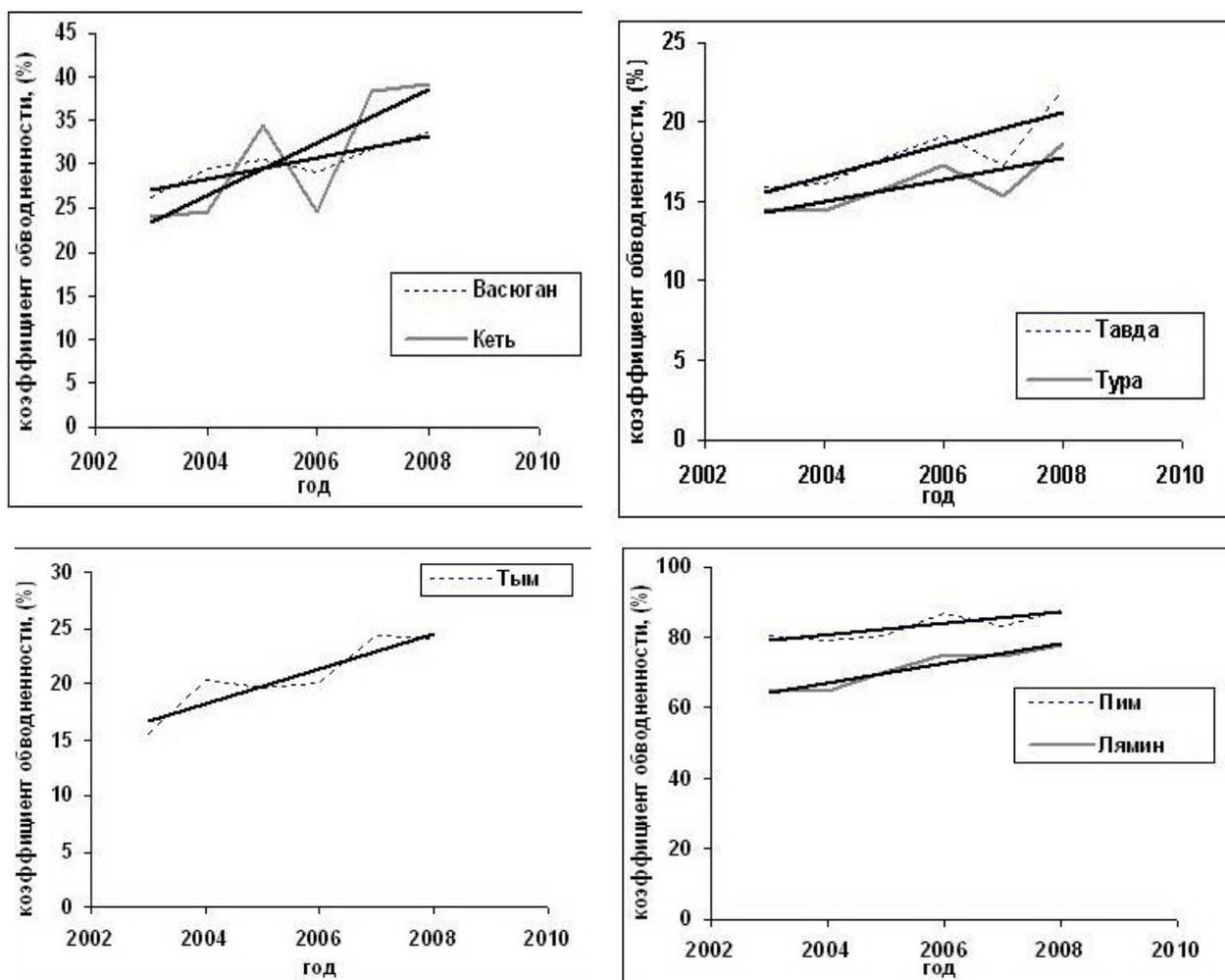


Рисунок 8 – Межгодовая изменчивость минимального за лето коэффициента обводненности в бассейнах рек (показаны только те из них, на которых наблюдается видимое увеличение обводненности)

Несмотря на некоторое увеличение обводненности в каждом географическом районе за 5-летний период, сложно предположить, в какую сторону будет меняться обводненность в дальнейшем. Поэтому спутниковый мониторинг для решения этой проблемы может быть продолжен с использованием новых программ спутниковой альтиметрии, что позволит увеличить длину временного ряда.

### Основные выводы и результаты работы следующие:

1. По данным метеостанций и реанализа исследована динамика изменений температуры воздуха и сумм атмосферных осадков в бассейнах рек, протекающих в разных гидролого-климатических и болотных зонах. Анализ данных по годовой температуре воздуха (1958-2001 гг.) показал, что наиболее сильное потепление наблюдается в северной части равнины на водосборах рек Надым и Таз ( $0,37^{\circ}\text{C}/10$  лет), а значимое увеличение сумм атмосферных осадков наблюдается в Зауралье и на водосборах рек Пур, Таз, Назым и Вах. Тенденция к увеличению сумм атмосферных осадков наблюдается по всей территории

равнины, кроме водосборов рек Васюган и Омь, которые характеризуются отрицательными знаками трендов.

2. Анализ сезонных изменений температуры воздуха и атмосферных осадков выявил следующее:
  - значимое увеличение температур воздуха наблюдается весной с наиболее сильным потеплением на севере равнины, а также на станции Барабинск ( $0,40-0,84^{\circ}\text{C}/10$  лет);
  - значимое увеличение сумм атмосферных осадков наблюдается в зимний, весенний и летний сезоны. Однако в весенний сезон значимое увеличение осадков наблюдается на большинстве водосборов рек равнины, расположенных в каждой гидролого-климатической и болотной зоне.
3. Изменения температуры воздуха и атмосферных осадков приводят к изменению в режиме обводненности территории. Метод спутниковой альтиметрии позволил оценить величину и межгодовую и сезонную изменчивость обводненности водосборов рек Обского бассейна.
4. Для оценки многолетних изменений коэффициента обводненности исследуемых водосборов в летний сезон и ее изменения по сезонам внутри года определено пороговое значение КОР для каждого водосбора по спутникам TOPEX/Poseidon и ENVISAT.
5. По данным спутника TOPEX/Poseidon предложена классификация речных бассейнов по характеру межгодового хода минимального летнего коэффициента обводненности, а также выделено четыре географических района. Данная классификация хорошо согласуется с классификацией по сходству динамики колебаний стока рек.
6. Выявлены водосборы, для которых межгодовая изменчивость обводненности по данным спутника TOPEX/Poseidon хорошо согласуется с суммой летних атмосферных осадков по реанализу за 1993-2001 гг.
7. Установлено, что со временем за 8 лет наблюдается значимое уменьшение обводненности (TOPEX/Poseidon) в области внутреннего стока Обь-Иртышского междуречья и на водосборе реки Омь.
8. По данным спутника ENVISAT выполнена классификация водосборов по характеру межгодового и внутригодового хода коэффициента обводненности. Выделены также 4 района, которые в целом совпали с районами, определенными по данным спутника TOPEX/Poseidon. Увеличение обводненности было обнаружено на водосборах рек Зауралья, Сургутского Полесья, Обь-Енисейского междуречья, а также на водосборе реки Васюган.

**В целом проведенные исследования показали репрезентативность данных спутниковой альтиметрии в отношении оценки степени обводненности речных водосборов и ее пространственно-временной изменчивости.**

**Перспективы дальнейших исследований.** Дальнейшие исследования будут направлены на уточнение пороговых значений КОР по конкретным водосборам для разделения ландшафтов, отличающихся разной степенью обводненности и

подтопления, и исследования динамики их обводненности по сезонам и за многолетний период.

### ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статьи, опубликованные в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных журналов и изданий:*

4. E.A. Zakharova, A.V. Kouraev, S. Biancamaria, **M.V. Kolmakova**, N.M. Mognard, V.A. Zemtsov, S.N. Kirpotin, B. Decharme. Snow cover and spring flood flow in the northern part of the Western Siberia (The Poluy, Nadym, Pur and Taz rivers) // Journal of Hydrometeorology. – 2011. – Vol. 12 (6). – P. 1498-1511. (1,42/0,11 п.л.).
5. **Колмакова М.В.**, Захарова Е.А., Кураев А.В., Земцов В.А., Кирпотин С.Н. Временная изменчивость климата и обводненности территории Западной Сибири по данным метеорологических станций, модельного реанализа и спутниковой альтиметрии // Вестник Томского государственного университета. – 2012. – № 364. – С. 173-180. (0,85/0,29 п.л.).

*Статьи в других научных изданиях:*

6. Zakharova, E.A., Kouraev, A.V., **Kolmakova, M.**, Mognard, N.M., Zemtsov V.A., Kirpotin S.N. The modern hydrological regime of the Northern Western Siberia from in situ and satellite observations // International Journal of Environmental Studies. – 2009. – Vol. 66, № 4. – P. 447-463. (1,05/0,15 п.л.).
7. **Колмакова М.В.**, Кураев А.В., Захарова Е.А., Кирпотин С.Н., Земцов В.А., Моньяр Н.М. Пространственно-временная изменчивость гидрологического режима и качества вод в криолитозоне Западной Сибири // Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов: материалы Третьей всероссийской научной конференции с международным участием (24-28 августа, 2010 г.). – Барнаул: Изд-во АРТ, 2010. – С. 141-145. (0,31/0,08 п.л.).
8. **Колмакова М.В.**, Захарова Е.А., Кураев А.В., Земцов В.А., Кирпотин С.Н. Временная изменчивость климата и обводненности в Западной Сибири по данным метеостанций, модельного реанализа и спутниковой альтиметрии // Климатология и гляциология Сибири: материалы Международной научно-практической конференции (16-20 октября, 2012 г.). – Томск: Изд-во Центр научно-технической информации, 2012. – С. 134-135. (0,18/0,10 п.л.).