

**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ ГЕОГРАФИИ**

На правах рукописи

Шмакин Андрей Борисович

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ
ЭНЕРГОВЛАГООБМЕНА НА СУШЕ**

АВТОРЕФЕРАТ

**Диссертации на соискание ученой степени
доктора географических наук**

**Специальность 25.00.30 – метеорология, климатология,
агрометеорология**

**Москва
2006**



Работа выполнена в Институте географии РАН.

Официальные оппоненты:

Доктор географических наук А.В.Кислов

Доктор географических наук Ю.П.Переведенцев

Доктор географических наук Д.И.Люри

Ведущая организация:

Главная геофизическая обсерватория им. А.И.Воейкова

Защита состоится 20 октября 2006 г. в 11-00 на заседании
Диссертационного Совета Д.002.046.04 при Институте географии РАН по
адресу: Москва, 119017, Старомонетный пер, 29.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИГ РАН.

Отзывы на автореферат (в 2 экземплярах, заверенные печатью) просьба
направлять в адрес Совета.

Автореферат разослан 2006 г.

Ученый секретарь Диссертационного Совета,
к.г.н.



И.С.Зайцева

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

К настоящему времени изучены основные механизмы в системе энерговлагообмена (ЭВО) на суше, построены карты средних многолетних составляющих теплового и водного баланса, а также исследованы главные закономерности их изменений. С 1990-х годов наблюдается значительный прогресс в численном моделировании потоков тепла и влаги на суше, что позволяет воспроизводить их поля на больших площадях и вычислять длительные ряды. Тем не менее, процессам возникновения упорядоченности тепло- и влагообмена в пространстве и времени до сих пор не уделялось должного внимания. Эти процессы обеспечивают развитие определённых структур в сложной системе ЭВО, т.е. её организацию в пространстве и времени. Намеченное исследование организации процессов ЭВО даст возможность не только обобщить полученные ранее закономерности поведения потоков энергии и влаги на суше в зависимости от внешних условий, но и составить более полное представление о данной системе в целом, что позволит выйти на новый уровень знаний о ней. Организация определяет структуры данной системы, относительно устойчивые в пространстве и времени, а также способ их функционирования и эволюции. Таким образом, разностороннее изучение организации ЭВО на суше сделает возможным выделение относительно инвариантных свойств данных процессов в определенных диапазонах внешних условий, выявление пределов характерной изменчивости потоков энергии и влаги, их взаимосвязи между собой и с другими компонентами климатической системы.

Цель и задачи

Цель работы – исследование механизмов формирования упорядоченных структур в системе ЭВО на суше в различных масштабах пространства и времени, в том числе при меняющихся свойствах атмосферы и ландшафтов. Выполнение цели связано с реализацией ряда задач:

1. Разработка критериев упорядоченности ЭВО на суше в различных пространственно-временных масштабах.
2. Изучение упорядоченности ЭВО в различных временных масштабах при изменениях свойств атмосферы и ландшафтов.
3. Изучение пространственной организации ЭВО при разномасштабных вариациях метеорологических параметров и свойств суши.
4. Исследование связи организованности ЭВО с его средними характеристиками по пространству и времени.
5. Разработка географической классификации ЭВО при современном состоянии климата и ландшафтов, и принципов учёта в ней временной динамики.

Методы

В работе широко используются математическое моделирование процессов переноса тепла и влаги на суше, а также географический анализ и статистическая обработка измеренных и вычисленных характеристик. Применяется несколько численных моделей ЭВО различной степени сложности: от упрощённой с длинным шагом по времени до детальной с полным учётом всех важнейших процессов тепло- и влагопереноса на суше. Разработан оригинальный подход к количественному описанию упорядоченности ЭВО, с применением различных её показателей для различных масштабов времени и пространства.

Научная новизна

В диссертации предлагается качественно новое обобщение существующих знаний об ЭВО на суше на основе выявления упорядоченности и взаимодействия соответствующих процессов в широком спектре пространственно-временных масштабов. В ходе выполнения работы получен ряд качественно новых результатов о функционировании системы ЭВО при изменениях параметров атмосферы и ландшафтов в пространстве и времени, о роли изменчивости внешних факторов в формировании потоков тепла и влаги.

Практическая значимость

Результаты работы позволят прогнозировать изменение всего комплекса энерговлагодорожора как целостной системы при определенных сценариях будущего состояния климата и природопользования. В частности, становится возможной оценка частоты экстремальных событий в системе ЭВО (засух, наводнений и т.д.) по метеорологическим данным либо по результатам моделирования. Методы, разработанные в ходе исследования, могут использоваться в целом ряде смежных направлений климатологии. Например, они дают возможность обоснования степени подробности описания процессов на суше при моделировании климата в определенных масштабах. Они могут, кроме того, стать основой для новых способов обработки результатов массовых экспериментов на численных моделях. Локальные модели ЭВО, использовавшиеся в работе, были существенно усовершенствованы благодаря подходам, разработанным в диссертации и результатам, полученным в ходе её выполнения.

Личный вклад автора

Автором лично разработано и протестировано две численные модели из трёх, использованных в работе. Постановка проблемы исследования и определение задач, подготовка и проведение численных экспериментов на этих двух моделях, включая программирование на всех стадиях, а также обработка их результатов выполнены лично автором. Разработка и тестирование третьей модели, а также эксперименты на ней, использованные для данной работы, проводились в Лаборатории геофизической гидродинамики (GFDL) Принстонского университета при участии автора. Численные эксперименты на своей модели по её сравнению с другими моделями ЭВО выполнялись лично автором по плану международных программ PILPS, SnowMIP и Rhone-AGG, а их анализ проводился совместно со всеми участниками.

Основные защищаемые положения

- Серия локальных моделей ЭВО на суше с различной подробностью описания процессов;

- Объективные показатели структуры теплового и водного баланса и упорядоченности ЭВО в различных масштабах времени и пространства;
- Количественные оценки роли сезонного и межсезонного хода метеорологических параметров во временной организации ЭВО на суше, а также зональных и региональных различий параметров – в его пространственной организации;
- Принципы географической классификации ЭВО на суше на основе меняющихся соотношений между параметрами;
- Закономерности в соотношениях между различными показателями ЭВО, связанные с его упорядоченностью в пространстве и времени.

Апробация работы и публикации

Основные положения диссертации докладывались на 25 международных конференциях в России и многих других странах, а также на рабочих семинарах в ряде научных организаций России, США, Франции и Австрии. По тематике диссертации опубликовано 39 статей, из них 30 в российских и международных реферируемых журналах и изданиях.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Общий объём работы – 135 страниц, включающих 36 рисунков и 3 таблицы.

II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении кратко освещена история исследований процессов ЭВО на суше, охарактеризована их важность для всей климатической системы, разъяснены понятия организованности и организации в приложении к тепло- и влагообмену. Обоснована актуальность темы, поставлены цели и задачи работы, охарактеризованы методы исследования, новизна и практическая значимость.

В разделе 1.1 главы 1 приводится описание системы ЭВО на суше с указанием основных закономерностей формирования потоков тепла и влаги

на подстилающей поверхности. Отдельно рассматриваются процессы, обеспечивающие приток энергии и воды к поверхности суши, усвоение тепла и влаги деятельным слоем суши, и потоки, уносящие эти субстанции от подстилающей поверхности. Приводятся уравнения, используемые для расчётов составляющих теплового и водного баланса в классических работах. В разделе 1.2 рассмотрены типичные пространственно-временные масштабы процессов ЭВО. Проанализированы частоты, преобладающие в спектре вариаций каждого процесса трансформации тепла и влаги в зависимости от ландшафтных и атмосферных свойств, а также регулярная и случайная составляющие в изменениях обеих групп факторов. Выделен диапазон масштабов, в которых проводится исследование организации ЭВО: от суток до нескольких десятилетий во времени и от сотен метров до тысяч километров в пространстве. В разделе 1.3 подробно рассмотрены имеющиеся представления об организации и организованности ландшафтов суши и отдельных процессов в них. Там же проанализированы показатели, которые можно было бы использовать для количественной характеристики степени упорядоченности ЭВО. Показано, что использование информационной энтропии может в ряде случаев привести к ошибочным выводам об упорядоченности потоков тепла и влаги. Более удобной характеристикой является среднеквадратическое отклонение (СКО), но только если исследуемый временной масштаб существенно превышает характерный временной масштаб вариаций. В противном случае СКО также не полностью характеризует упорядоченность процесса. Исходя из этого, сделан вывод о необходимости учёта не только изменчивости параметров, но и частоты изменений режима тепло- и влагообмена.

Глава 2 включает краткий обзор истории развития численных моделей ЭВО на суше, а также описание моделей, разработанных автором либо при его участии в рамках данной работы. Приведены основные уравнения моделей автора и схемы их вертикальной структуры. Модели отличаются степенью сложности и полнотой учтённых в них процессов. Упрощённая

модель SiLC разработана для воспроизведения сезонных и многолетних изменений составляющих теплового и, прежде всего, водного баланса [Шмакин, Попова, 2003]. Она имеет шаг по времени, равный месяцу, и простое описание процессов на подстилающей поверхности. Тем не менее, в ней кардинально отличаются по методу описания холодный и тёплый сезоны. Модель LaD разрабатывалась для описания взаимодействия суши с атмосферой в глобальной модели климата Лаборатории геофизической гидродинамики (GFDL) Принстонского университета, однако может использоваться и вне климатической модели как независимое средство [Milly, Shmakin, 2002a]. В ней учтены основные процессы тепло- и влагопереноса на суше, кроме перехвата осадков растительностью и фазовых переходов в почве; достаточно просто формализовано описание влагообмена в почве. Шаг по времени может составлять порядка нескольких часов. Модель SPONSOR включает описание всех основных процессов ЭВО в системе почва – растительность – снежный покров – атмосфера с шагом по времени порядка 1-6 часов [Shmakin, 1998; Шмакин, 1999]. На модели выполнялись многочисленные эксперименты по международным программам сравнения моделей такого класса. Её отдельные блоки использовались и для подключения к модели общей циркуляции атмосферы Гидрометцентра России. В этой же главе дан перечень всех численных экспериментов, выполненных в рамках данной работы, а также дополнительная информация. В частности, приведён список 22 речных бассейнов мира, по которым проводилось тестирование модели LaD (измеренный сток использовался для независимого контроля).

Глава 3 посвящена анализу результатов численных экспериментов, проведённых для выявления роли сезонного хода в среднесезонном режиме ЭВО, а также вклада пространственной упорядоченности параметров в масштабе природных зон. В **разделе 3.1** сделана общая оценка роли сезонных вариаций метеорологических параметров в среднегодовом ЭВО на суше. Для этого на модели LaD были проведены эксперименты с глобальным

охватом и пространственным разрешением 1° за 1987-88 гг. [Milly, Shmakin, 2002a; Milly, Shmakin, 2002b]. В базовом эксперименте использовались реальные метеорологические параметры за указанные два года с шагом 6 часов, в другом эксперименте они осреднялись за каждый месяц, а в третьем – за год. Расчётные значения стока сравнивались с данными годовых измерений по 22 речным бассейнам. Результаты показали, что при использовании среднемесячных метеорологических параметров среднеквадратическое отклонение годового коэффициента стока (отношения стока к осадкам) от базового эксперимента составляет 0,026, а при использовании среднегодовых значений – 0,123, т.е. в 4,7 раза больше. Хотя эксперимент со среднемесячным осреднением метеорологических параметров продемонстрировал систематическое занижение коэффициента стока (о чём речь подробнее пойдёт в главе 4), его результаты в целом в несколько раз ближе к действительности, чем при среднегодовом осреднении. Таким образом, сезонные вариации задают основную моду в колебаниях ЭВО на суше и существенно влияют не только на внутригодовое распределение потоков тепла и влаги, но и на среднюю годовую структуру теплового и водного баланса. Приведённые здесь результаты существенно не меняются от одной климатической зоны к другой.

В разделе 3.2 в качестве универсальной характеристики структуры ЭВО с учётом сезонного хода предложен показатель ресурсов тепла и влаги (РТВ), вычисляемый по среднемесячным значениям параметров по формуле [Шмакин, 2006]:

$$I_{EWR} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{R_i - M_i}{P_i + M_i} \geq 0,$$

где R – радиационный баланс в единицах слоя воды (соответствующих расходам на испарение или сублимацию), M – слой стаявшего снега, P – сумма жидких осадков, i – номер месяца, N – число месяцев в выборке (при

вычислении за год – 12, за сезон – 3 и т.д.). Если значение показателя в какой-то месяц принимает отрицательное значение, оно не добавляется к сумме. Переменные R и M рассчитывались с применением модели SiLC. Значения индекса РТВ слабо зависят от специфики конкретной модели, поскольку в среднемесечном выводе переменные R и M мало меняются от одной модели к другой [Chen et al., 1997].

В расчёты показателя РТВ на каждом шаге включены ресурсы тепла и жидких осадков только за данный месяц, а ресурсы снега (в случае вычислений для периода снеготаяния) – за весь предшествующий сезон. При этом температурные условия холодного сезона не сказываются на итоговом значении показателя, что отражает реальную ситуацию с влагооборотом на суше. Ресурсы почвенной влаги не учитываются в расчётах явно, поскольку они представляют собой разность между осадками и испарением, а не независимую переменную.

Как следует из приведённого уравнения, при вычислении суммы за год показатель РТВ по физическому смыслу близок к индексу сухости М.И.Будыко [1971], но отличается от него учётом сезонного хода, в том числе снежного покрова. Это отличие отражается и в результатах расчётов двух индексов (показателя РТВ согласно эксперименту SiLC-base и индекса сухости М.И.Будыко) для среднего многолетнего режима в 1961-90 гг., приведённых на рис. 1 [Шмакин, 2006].

Характерно, что максимальные значения показателя РТВ наблюдаются в пустынях Средней Азии, а индекса сухости – в пустыне Гоби. Это связано с сезонным ходом температуры и осадков: в Гоби максимум осадков совпадает с максимумом температуры, а в Средней Азии летом наблюдается минимум осадков. В целом, за исключением Средней Азии и некоторых других районов, показатель РТВ в Северной Евразии понижен по сравнению с индексом сухости. Это связано с наличием в умеренной зоне нескольких месяцев в переходные сезоны, в течение которых приток тепла невелик по сравнению с притоком влаги, особенно при снеготаянии. При этом изолиния

1,0 показателя РТВ гораздо точнее отражает положение границы между лесом и степью, чем аналогичная изолиния индекса сухости, хотя по замыслу М.И.Будыко последняя должна располагаться именно вблизи этой границы.

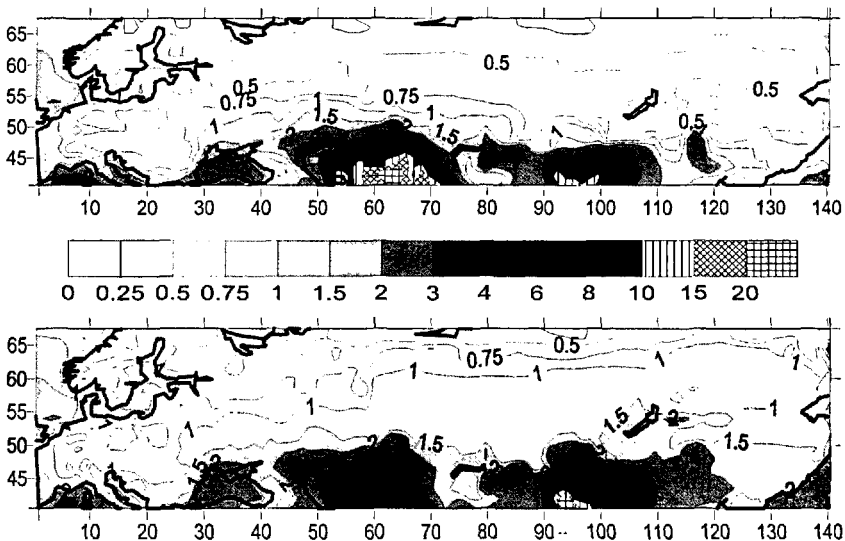


Рис. 1. Среднегодовой показатель РТВ по данным вычислений на модели SiLC (вверху) и индекс сухости М.И.Будыко по данным измерений радиационного баланса [Darnell, 1999] и осадков [Leemans, 1990] (внизу)

Интересные результаты могут быть получены при анализе показателя РТВ по отдельным месяцам, сезонам или годам. Например, в летние месяцы в средних широтах России показатель РТВ везде превышает значение 1, а на значительной площади – 2, т.е. имеет место существенное преобладание ресурсов тепла над ресурсами влаги. Таким образом, только наличие холодного сезона и образующихся за это время излишков влаги позволяет отнести большую часть России к зоне достаточного увлажнения.

В отдельные годы показатель РТВ может принимать различные значения, отражая колебания климатических условий данного района. Так, в

1990-е годы, согласно расчётам на модели SiLC на основе данных измерений, произошло заметное изменение распределения показателя РТВ в северной Евразии по сравнению с 1961-90 гг. (рис. 2). Вопреки существующим взглядам о том, что наблюдающееся потепление приводит к повышению засушливости [Груза, Ранькова, 2003 и др.], приведённая карта свидетельствует о сдвиге изолиний индекса РТВ к югу, т.е. о повышении увлажнённости на большей части северной Евразии. Это объясняется тем, что повышение температуры происходит преимущественно зимой, т.е. в сезон, который вследствие отрицательных значений радиационного баланса не вносит никакого вклада в годовое значение показателя [Шмакин, Попова, 2006]. В то же время некоторое повышение осадков в зимнее время на большей части территории [Попова, 2004] повлияло на снижение индекса РТВ в весенний сезон, и следовательно, в годовом выводе. В полупустынных районах Прикаспия увеличение увлажнения в 1990-е годы, заметное на рис. 2, произошло в основном за счет роста осадков в тёплый период года, что подтверждается и независимыми данными по вегетационным индексам [Золотокрылин, 2003].

В ходе эксперимента SiLC-2070 были вычислены значения показателя РТВ по территории северной Евразии на период до 2070 г. согласно сценарию изменений климата по модели ЕСНАМ [МРІ]. В этом случае происходит постепенное смещение изолиний к северу, т.е. увеличение засушливости, хотя в отдельных районах Средней и Центральной Азии, Забайкалья засушливость уменьшается. Это связано с прогнозируемым повышением температуры во все сезоны (с более сильным потеплением зимой и более слабым – летом) и с отсутствием изменения сумм осадков в летние месяцы. Зимние осадки, согласно данному сценарию, возрастают, однако вклад этого роста оказывается несущественным по сравнению с ростом температуры.

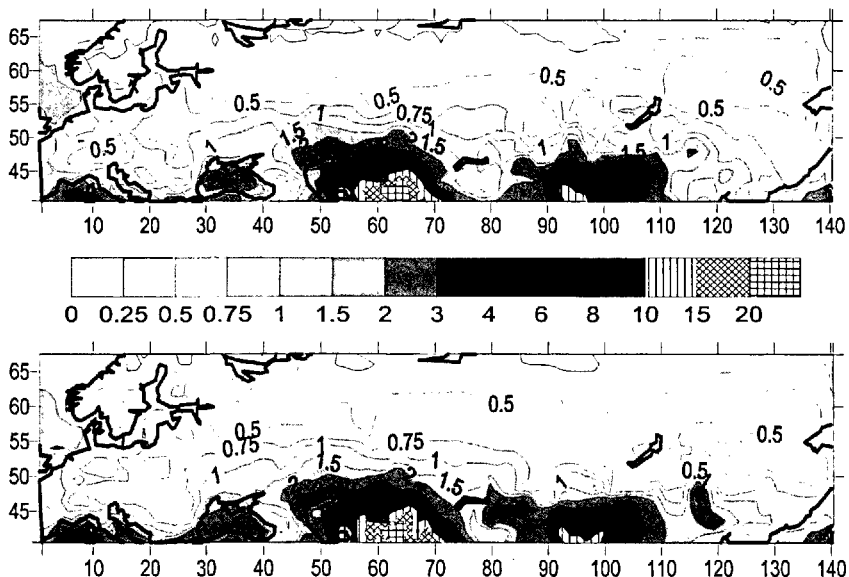


Рис. 2. Среднегодовой показатель РТВ по данным вычислений на модели SiLC за периоды 1991-2000 гг. (вверху) и 1961-90 гг. (внизу)

Показатель РТВ может служить основой для географической классификации крупных территорий по признаку соотношения тепла и влаги. В данной работе предлагается не новая географическая классификация энерговлагообмена как таковая, а разрабатываются принципы динамических классификаций природных процессов, способных учесть их изменчивость в пространстве и времени. Можно выделить такие пороговые значения среднегодового значения показателя РТВ, как 0,5, 1 и 2, соответствующие границам между зонами значительного переувлажнения, умеренного переувлажнения, умеренного недостатка влаги и значительного недостатка влаги. На положении этих границ в современную эпоху (рис.1) может быть основана базовая версия географической классификации энерговлагообмена на суше.

В разделе 3.3 рассматриваются вопросы упорядоченности сезонных колебаний энерговлагообмена. Сделан вывод о том, что для изучения

упорядоченности целесообразно выделить два диапазона изменений энерговлагообмена, граница между которыми проходит по характерному масштабу около месяца: в одном диапазоне межсуточные вариации, а в другом – более низкочастотные колебания. Что касается пространственных масштабов, то они в общем соотносятся с указанными временными: межсуточные колебания соответствуют масштабу регионов, в которых происходит перенос погодных систем, а сезонный ход – природным зонам, отличающимся друг от друга среднеклиматическим режимом. В качестве показателя сезонной упорядоченности энерговлагообмена предложено среднеквадратическое отклонение (СКО) индекса РТВ ($\sigma_{РТВ}$), вычисленное в течение года по 12 среднемесячным значениям. В умеренных широтах при наличии холодного сезона, когда индекс РТВ обращается в нуль, и теплого, когда несколько месяцев дают решающий вклад в годовое значение индекса, следует ожидать достаточно высокой упорядоченности в его сезонных вариациях.

Оценка показала, что для показанной на рисунках части северной Евразии поле значений $\sigma_{РТВ}$ за период 1961-90 гг. коррелирует с полем среднего значения самого индекса РТВ с коэффициентом 0,96. Максимумы среднегодовых значений индекса РТВ в Северной Евразии формируются в пустынях Средней и Центральной Азии за счёт летних пиков, а минимумы – в тундровых районах Субарктики вследствие низких значений в течение всего года. В этих же районах наблюдаются соответственно наибольшая и наименьшая сезонная изменчивость индекса РТВ.

Для случаев, когда невозможно провести моделирование полного цикла тепло- и влагообмена, показателем упорядоченности энерговлагообмена в масштабе месяцев может служить СКО соотношения радиационного баланса и осадков, выраженных в энергетических единицах ($\sigma_{СРБО}$). Как показывают оценки, этот показатель коррелирует со значением РТВ на той же территории с коэффициентом 0,86. В то же время, показатель

$\sigma_{CРВО}$ не всегда может достоверно характеризовать сезонную организацию энерговлагодобора в конкретных регионах.

Раздел 3.4 посвящён оценке вклада ландшафтных свойств в организацию тепло- и влагооборота в глобальном масштабе. Для этого было проведено два эксперимента на модели LaD с глобальным охватом и разрешением 1x1 градус за 1987-88 гг.: в одном использовались реальные параметры растительности, а в другом – средние глобальные константы в качестве трёх параметров растительности: альbedo, устьичного сопротивления и эффективной глубины корневой зоны [Milly, Shmakin, 2002b]. Среднеквадратическое отклонение (СКО) разности между измеренными и вычисленными значениями коэффициента стока составляет 0,065 для базового эксперимента с реальными параметрами растительности и 0,095 для эксперимента со средними глобальными параметрами. В базовом эксперименте только в одном бассейне из 22 коэффициент стока был вычислен с ошибкой, превышающей возможную погрешность за счёт неточностей в осадках. В эксперименте с осредненными параметрами число таких бассейнов выросло до семи, причём доминирующая растительность в них в основном представлена травяным покровом и широколиственным опадающим лесом, с максимальными ошибками в последнем типе. Это объясняется существенной недооценкой устьичного сопротивления в широколиственных опадающих лесах при использовании средних глобальных значений. Как следствие, в этих бассейнах возрастает испарение и заметно сокращается сток. Роль устьичного сопротивления оказалась доминирующей среди всех параметров растительности в смысле влияния на структуру тепло- и влагообмена. Использование реальных географических различий в свойствах растительности позволяет улучшить точность модельных расчётов более чем наполовину в среднем по 22 бассейнам, и резко сократить число бассейнов со значительными ошибками в вычислениях.

Результаты эксперимента с глобально осредненными параметрами растительности оказались ближе к реальности, чем расчёт по уравнению связи М.И.Будыко, в котором СКО разности между измеренными и вычисленными значениями коэффициента стока составляет 0.11 [Milly, Shmakin, 2002b]. В расчёте по уравнению связи использовались реальные значения ландшафтных параметров, но среднегодовые значения метеорологических параметров. Очевидно, игнорирование пространственной изменчивости ландшафтных параметров приводит к меньшей погрешности, чем игнорирование сезонного хода метеорологических параметров. Таким образом, пространственные различия в растительном покрове играют менее важную роль в организации энергообмена по сравнению с сезонными вариациями атмосферных процессов.

Глава 4 содержит анализ роли колебаний тепло- и влагооборота в масштабе синоптической изменчивости в организации ЭВОВ пространстве и времени. Масштабы этих колебаний составляют от суток до месяца во времени и от сотен до первых тысяч километров в пространстве. В **разделе 4.1** выполнена общая оценка роли межсуточных изменений погоды в среднегодовом энергообмене на суше. Это сделано с помощью расчётов на модели LaD по всей суше на период 1987-88 гг. с использованием среднемесячных значений метеорологических параметров на каждом шаге по времени, т.е. с игнорированием их межсуточной изменчивости. Использование среднемесячных значений метеорологических параметров ведёт к существенному занижению стока по сравнению с базовым расчётом с шагом 6 часов. При использовании среднемесячных значений облачности и осадков условия соответствуют морозящим осадкам при переменной облачности, т.е. ситуации, в которой сток становится незначителен, а испарение резко возрастает по сравнению с реальностью. На самом деле, благодаря организации во времени, длительность выпадения осадков сравнительно невелика в сочетании с очень небольшим притоком тепла, что и способствует формированию стока в эти отрезки времени. В другой серии

численных экспериментов на модели LaD было показано, что на изменения энерговлагообмена в данном бассейне сильнее всего влияют вариации осадков, в то время как другие метеорологические параметры играют меньшую роль [Shmakin et al., 2002]. Поскольку в умеренных широтах, наряду с сезонным ходом, осадки наиболее сильно меняются благодаря синоптической изменчивости, это ещё раз подчёркивает степень зависимости тепло- и влагообмена от организации в межсуточном масштабе времени.

В разделе 4.2 рассматриваются характеристики изменений теплового и водного баланса суши в межсуточном масштабе. Для этого введено понятие преобладающего потока, превышающего по интенсивности в эквивалентных единицах другие потоки энерговлагообмена в течение данного отрезка времени на определённой территории суши. Достаточно универсальный перечень может включать следующие типы преобладающих потоков:

- накопление жидкой воды в почве и/или снега на поверхности,
- формирование стока,
- испарение снега или почвенной влаги,
- нагрев атмосферы явным теплом.

Ещё один тип преобладающего потока («нейтральный») выделяется при низкой интенсивности нескольких потоков тепла; обычно такие условия наблюдаются при слабом приходе радиации и отсутствии осадков (ночью, зимой и т.п.). При необходимости особого исследования процессов в снежном покрове выделяются ещё три типа преобладающих потоков:

- снегонакопление,
- накопление талой воды (в снежной толще и/или в почве),
- сток талой воды.

Если имеет место совпадение во времени нескольких потоков примерно равной интенсивности (например, испарения и потока явного тепла), такую ситуацию тем не менее можно (хотя бы формально) отнести к какому-либо из перечисленных типов по наибольшему из потоков. Таким образом, всё

разнообразие энерговлагообмена на суше может быть описано как чередование нескольких (5 или 8 при различных способах обобщения) типов взаимоисключающих событий.

Изучение энерговлагообмена на суше с помощью преобладающих потоков позволяет выделить наиболее существенные процессы в данном месте и в данный отрезок времени, абстрагируясь от второстепенных деталей. При переходе от множества отдельных потоков энергии и влаги к преобладающему потоку количественный анализ заменяется на качественный, что делает возможным исследовать энерговлагообмен с новых позиций и получить более обобщённую его картину.

Для проверки чувствительности качественного подхода к специфике конкретных моделей были проанализированы результаты эксперимента PILPS2d, выполнявшегося на материалах Валдайской гидрологической лаборатории за 1966-1983 гг. В эксперименте принимала участие 21 модель энерговлагообмена из различных исследовательских центров мира, в том числе и модель автора SPONSOR. Оценивалось среднее квадратическое отклонение (СКО) между значениями отношения Боуэна (отношения потоков явного и скрытого тепла), полученного всеми моделями, т.е. его межмодельный разброс. СКО были вычислены для двух способов обработки результатов вычислений – количественного и качественного. Для количественного способа использовались непосредственные значения отношения Боуэна, полученные каждой моделью, а для качественного оно вычислялось как отношение числа случаев с преобладанием потока явного тепла к числу случаев с преобладанием испарения по каждой модели. СКО отношения Боуэна между моделями составило 1,35 для количественного (традиционного) способа и 0,77 для качественного (основанного на выделении преобладающих потоков). Таким образом, разброс результатов между моделями при использовании преобладающих потоков сократился более чем на 40%.

Была также исследована теснота связи между отношением Боуэна, вычисленным по данным моделирования, и отношением числа случаев преобладания потоков явного и скрытого тепла. Это было сделано для бассейна р. Рона, по которому в распоряжении автора, благодаря участию в эксперименте Rhone-AGG, имелись данные по осадкам и другим метеорологическим параметрам с пространственным разрешением около 8 км с 3-часовым шагом за 1985-89 гг. Бассейн р. Рона представляет собой уникальный по освещённости данными регион размером приблизительно 520x370 км, включающий высотные зоны от высокогорья Альп до побережья Средиземного моря. Вычисления проводились с применением модели SPONSOR на период с августа 1985 по июль 1989 г., причём первый год использовался только для приспособления модели к метеорологическим условиям. Среднее за этот период отношение Боуэна для каждой из 1471 экспериментальных ячеек, вычисленное на модели, коррелирует с отношением числа случаев преобладания потоков явного и скрытого тепла в этих же ячейках с коэффициентом 0,94 (рис. 3).

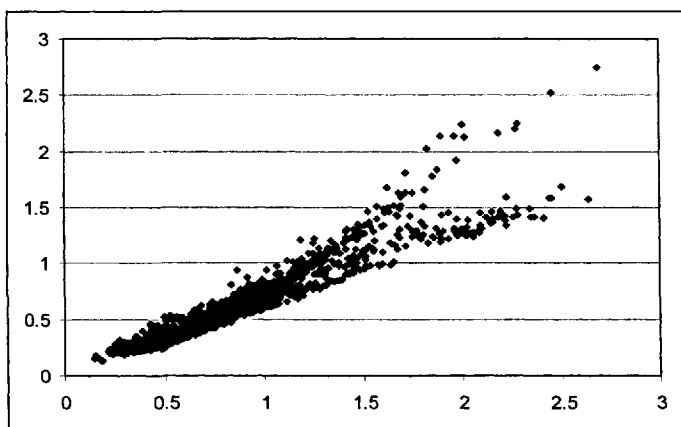


Рис. 3. Отношение потоков явного и скрытого тепла (ось абсцисс) и отношение числа случаев с преобладанием этих же потоков (ось ординат) в бассейне р. Рона за 1986-89 гг. по данным вычислений на модели SPONSOR

Как следует из рис. 3, при очень высокой корреляции отношение Боуэна, полученное с применением качественного подхода, несколько ниже отношения Боуэна, непосредственно вычисленного на модели (в среднем на 28%). Тем самым удастся избавиться от некоторого завышения отношения Боуэна моделью SPONSOR в бассейне р. Рона, что было выяснено при сравнении её с другими моделями [Boone et al., 2004]. Таким образом, соотношение числа случаев с преобладанием тех или иных потоков тепла и влаги может служить характеристикой структуры теплового и водного баланса в региональном масштабе, что позволяет частично избавиться от недостатков, присущих конкретной модели.

Для ряда засушливых регионов были получены сходные результаты. Так, для района, включающего горы юго-востока Казахстана, часть пустынь Джунгарии и Такла-Макана, а также часть Восточного Тянь-Шаня, получена аналогичная закономерность в тёплый период, отличающийся высокими значениями отношения Боуэна (до 10,8), с коэффициентом корреляции 0,83.

В разделе 4.3 исследуется временная упорядоченность процессов энерговлагообмена в масштабе синоптических вариаций. В качестве её показателя предложена частота смен преобладающих потоков энерговлагообмена, обратно пропорциональная упорядоченности. Эта характеристика может быть определена даже точнее, чем сами преобладающие потоки, поскольку в случае примерного равенства двух наибольших потоков (например, потока явного тепла и испарения) и постепенного ослабления одного из них на протяжении нескольких дней между ними происходит только один переход, пусть и плавный. Последовательность смены преобладающих потоков в основном определяется состоянием погоды, и прежде всего выпадением осадков и вариациями облачности. При дожде происходит сначала накопление воды в почве, затем при избытке дождевой воды – сток, затем преобладает испарение, а через несколько суток – поток явного тепла. При более частом

выпадении дождя очередность смены преобладающих потоков снова возвращается к условному началу.

Для характеристики упорядоченности синоптических вариаций необходимо выключить из рассмотрения суточный ход энерговлагообмена, иначе как минимум две смены преобладающих потоков в сутки появятся благодаря появлению нейтрального случая вечером и исчезновению – утром. Поэтому смену преобладающих потоков необходимо оценивать между дневными часами соседних суток.

Для случаев, когда недоступна информация о значениях потоков тепла и влаги (и тем самым о преобладании одного из них), в качестве показателя упорядоченности может служить частота смены типов погоды [Shmakin, 2005]. Типы погоды в этом смысле выделяются по преобладанию прихода тепла либо влаги (плюс нейтральный случай с незначительным приходом и того, и другого).

Важнейший вопрос, связанный с упорядоченностью энерговлагообмена в масштабе синоптической изменчивости – её влияние на средние по времени потоки тепла и влаги. Это влияние исследовалось по нескольким регионам Евразии. В бассейне р. Рона была выявлена довольно тесная обратная связь между частотой смены преобладающих потоков и отношением Боуэна (рис. 4): коэффициент корреляции составляет $-0,71$. При относительно небольшом (до 370 за 3 года) числе смен отношение Боуэна уменьшается при более частой смене преобладающего потока (т.е. при меньшей упорядоченности), т.е. растёт испарение и уменьшается поток явного тепла.

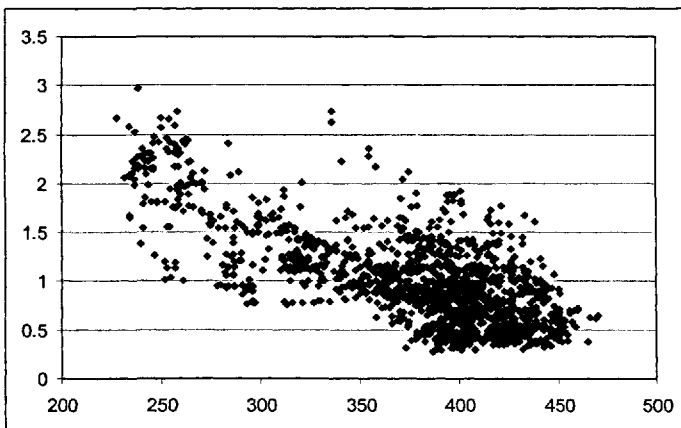


Рис. 4. Связь частоты смен преобладающих потоков энерговлагодобмена (ось абсцисс) и среднего отношения Боуэна по ячейкам за 3 года (ось ординат) в бассейне р. Рона по данным вычислений на модели SPONSOR

Такая закономерность, по-видимому, характерна для умеренного пояса, где меньшее число переходов между ситуациями означает более устойчивую сухую погоду с редкими дождями. В то же время при числе смен более 370 (т.е. чаще, чем раз в 3 дня) связь с отношением Боуэна становится нечёткой. Частота смены типов погоды связана с отношением Боуэна даже более тесно, чем частота смены преобладающих потоков: коэффициент составляет $-0,77$ благодаря тем же механизмам. Смена типов погоды также хорошо связана с испарением в летний сезон (коэффициент корреляции $0,77$), и хуже – со стоком ($0,42$).

Полученные выше закономерности проверялись также по значительной части Северной Евразии в других численных экспериментах на модели SPONSOR [Shmakin, 2005]. Они проводились для 1987-88 гг. с шагом 6 часов по ячейкам с 1-градусным пространственным разрешением; результаты анализировались для мая – сентября (т.е. за период, когда снежный покров отсутствует на большей части территории) и обобщались по регионам размером 10×10 градусов по широте и долготе. Для восточной части

Восточно-Европейской равнины получена высокая корреляция отношения Боуэна с частотой смены как типов погоды (рис. 5; коэффициент корреляции равен $-0,88$), так и преобладающих потоков. Здесь не рассматривался холодный сезон, т.к. в это время отношение Боуэна при небольших значениях потоков может сильно меняться без значительных изменений самих потоков.

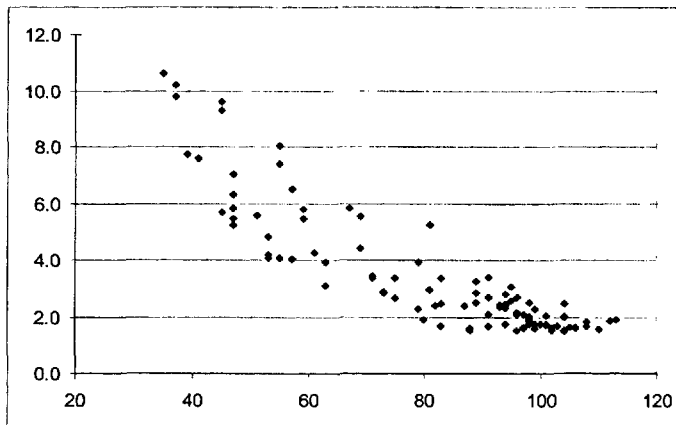


Рис. 5. Связь частоты смен типов погоды (ось абсцисс) и среднего отношения Боуэна по данным вычислений на модели SPONSOR (ось ординат) с мая по сентябрь 1987-88 гг. для восточной части ВЕР (50-60°с.ш., 50-60°в.д.).

Здесь подтверждается та же закономерность, что и в бассейне р. Рона: при учащении смены типов погоды структура теплового баланса меняется в сторону роста испарения. В то же время, как и в бассейне Роны, эта зависимость нелинейна: при сменах типов погоды чаще, чем раз в 3 дня (95 случаев за 10 месяцев) эта тенденция не проявляется.

Очевидно, этот предел естественно обусловлен спецификой всей системы энергообмена: для роста испарения необходимо, чтобы выпали осадки, затем погода сменилась бы на солнечную и успело бы испариться достаточно влаги, затем выпали бы новые осадки, и т.д. При слишком частой

смене погоды, т.е. при минимальной упорядоченности осадков во времени, испарение расти уже не успевает. По результатам этих экспериментов можно сделать вывод о том, что в масштабе сотен километров наблюдается значимая корреляция между упорядоченностью атмосферных процессов и структурой теплового баланса.

При анализе связи структуры теплового баланса с межсуточной упорядоченностью энергообмена по площади всего субконтинента связи становятся менее чёткими, и прослеживаются лишь наиболее общие закономерности в масштабе субконтинента. Например, частота смены типов погоды и отношение Боуэна на территории части Северной Евразии (40-70°с.ш., 20-120°в.д.) за май-сентябрь коррелируют с коэффициентом -0,37.

В ряде регионов Северной Евразии в тёплый сезон проявились связи упорядоченности погодных условий с коэффициентом стока, причём связи разного характера. Например, на юге Западной Сибири получилось два семейства точек (рис. 6): с коэффициентом стока менее 0,4 (в засушливой зоне) и более 0,4 (в более влажных условиях). При небольшом коэффициенте стока, соответствующем степям с засушливыми условиями, наблюдается его рост с увеличением числа смен типов погоды, а при более высоком увлажнении – обратная закономерность. Общй коэффициент корреляции по всему региону составил 0,65; для зоны степей 0,74, а для зоны южной тайги - 0,53. Очевидно, в зоне степей рост числа смен типов погоды означает учащение дождей и соответственно некоторый рост стока по сравнению с засушливыми условиями, а в зоне достаточного и избыточного увлажнения тот же рост неупорядоченности в погоде сопровождается ростом испарения и сокращением стока.

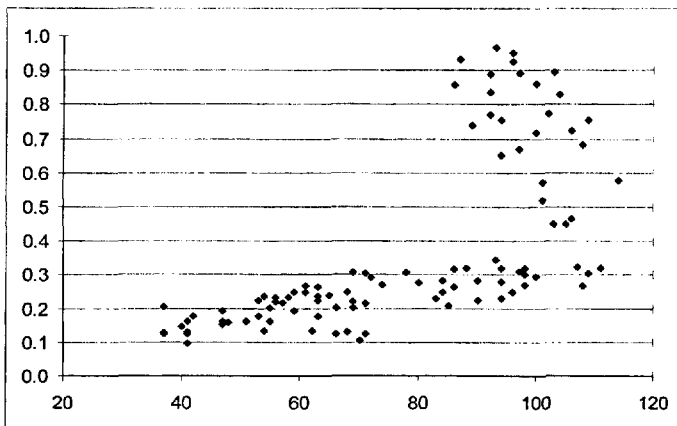


Рис. 6. Связь частоты смен типов погоды (ось абсцисс) и среднего коэффициента стока по данным вычислений на модели SPONSOR (ось ординат) с мая по сентябрь 1987-88 гг. для юга западной Сибири (50-60°с.ш., 60-70°в.д.).

Таким образом, зависимости между межсуточной упорядоченностью погодных условий и стоком неоднозначны и не всегда линейны, что связано с общим климатическим фоном. В засушливых условиях обычно наблюдается прямая пропорциональность (повышение неупорядоченности приводит к повышению коэффициента стока), во влажных - наоборот.

В разделе 4.4 рассматривается роль пространственных вариаций атмосферных и ландшафтных параметров в организации тепло- и влагооборота на региональном уровне. По бассейну р. Рона было проведено 9 численных экспериментов с пространственным разрешением метеорологических и ландшафтных параметров 8 км, 0,5° и 1°, причём чередовались все возможные сочетания разрешения атмосферных (с одной стороны) и ландшафтных (с другой) параметров [Shmakin, Myasnikova, 2002]. В этих экспериментах исследовалось, насколько чувствителен энергообмен к пространственному разрешению, а следовательно, к пространственной организации двух групп факторов. Результаты довольно близки в каждой из серий экспериментов с одним и тем же

пространственным разрешением метеорологических параметров, и отличаются довольно существенно между сериями с одинаковым разрешением ландшафтных параметров и разным – по метеорологическим. Этот результат свидетельствует о существенно меньшей роли разрешения параметров суши по сравнению с атмосферными. Тем самым, пространственная упорядоченность свойств растительности и почвы играет подчинённую роль по сравнению с упорядоченностью метеорологических параметров в данном масштабе. Этот результат совпадает и с полученным в главе 3 для масштабов природных зон, что говорит о его независимости от пространственного масштаба.

По результатам эксперимента с наилучшим (8x8 км) разрешением как по метеорологическим, так и по ландшафтным параметрам оценивалась также степень пространственной упорядоченности энергообмена с применением того же подхода, что и в разделе 4.3. Для каждой ячейки в данный день выявлялся преобладающий поток, после чего оценивалось число пространственных переходов между группами ячеек с различными преобладающими потоками. Затем вычислялось число пространственных переходов и значения составляющих энергообмена за каждый месяц. Аналогично оценивалось и число пространственных переходов между типами погоды в терминах прихода тепла или влаги. На рис. 7 показана полученная связь между отношением Боуэна и частотой пространственных переходов между типами погоды в бассейне Роны.

Связь получилась достаточно тесной: коэффициент корреляции составил -0,70. Обращает на себя внимание, что как и в случае с временной упорядоченностью типов погоды, рост числа переходов между типами погоды в пространстве (т.е. уменьшение размеров погодных очагов) снижает отношение Боуэна, т.е. способствует росту испарения и падению потока явного тепла.

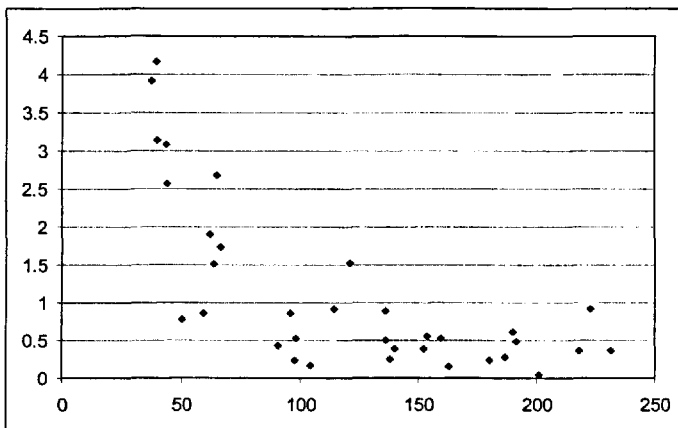


Рис. 7. Связь частоты смен типов погоды в пространстве за 36 месяцев (ось абсцисс) с отношением Боуэна за эти же месяцы (ось ординат) в бассейне р. Рона.

В то же время структура теплового баланса меняется при увеличении числа смен типов погоды только до некоторого критического значения (в данном случае около 140 на 1470 ячеек, что эквивалентно размерам очагов порядка 80×80 км), а при более частых пространственных сменах она практически постоянна. В такой ситуации испарение уже не имеет ресурса для роста, поскольку при частых вторжениях зон осадков оно невелико (поскольку мал приход ресурсов тепла), а между этими вторжениями успевает испариться лишь ограниченное количество влаги. Критический порог в неупорядоченности, при превышении которого структура теплового баланса уже не меняется, обнаруживается как во временной, так и в пространственной организации энергообмена.

Следует также отметить, что связь коэффициента стока с пространственной упорядоченностью как погоды, так и преобладающих потоков энергообмена в целом получилась незначимой (рис. 8).

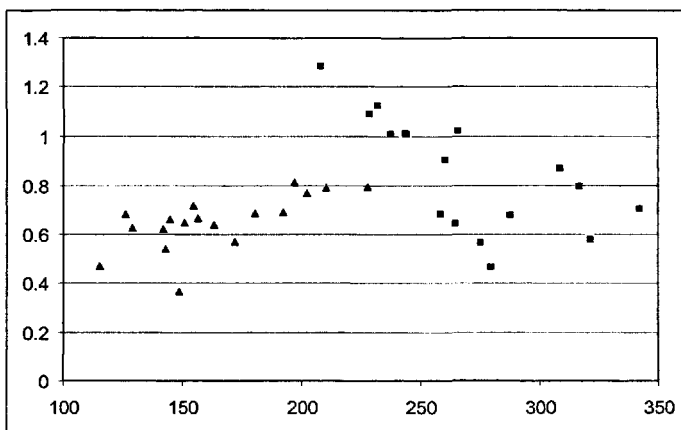


Рис. 8.- Связь частоты смен преобладающих потоков энерговлагообмена в пространстве за 36 месяцев (ось абсцисс) с коэффициентом стока за эти же месяцы (ось ординат) в бассейне р. Рона. Значения тёплого периода показаны треугольниками, холодного – квадратами. Коэффициент стока может превышать единицу в месяцы со снеготаянием.

Однако на рис. 8 явно выделяются два отдельных семейства точек. Одно из них, показанное треугольниками и относящееся к тёплому полугодю, имеет довольно тесную прямо пропорциональную связь (коэффициент корреляции 0,68), а второе, показанное квадратами и полученное для холодного полугодия – довольно тесную обратную пропорциональность (коэффициент корреляции -0,69). Нетрудно заметить, что в качественном отношении эта картина близка к полученной для временной упорядоченности смен типов погоды на юге Западной Сибири (рис. 6). В бассейне Роны, большая часть которой имеет чёткую сезонность в распределении осадков с максимумом зимой, ситуация тёплого сезона соответствует зоне степей в Западной Сибири, а холодного – зоне тайги. В тёплый сезон рост пространственной неупорядоченности ведёт к росту коэффициента стока, т.к. это эквивалентно появлению на территории большего числа дождливых участков и большей вероятности стока. В

холодный сезон увеличение пространственной неоднородности преобладающих потоков означает, что при общем достаточном увлажнении территории появляется больше очагов сухой погоды, что и влечёт за собой падение коэффициента стока. В этом смысле пространственная и временная упорядоченность энерговлагообмена оказались эквивалентны друг другу.

III. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработаны три модели локального энерговлагообмена на суше с различной степенью детальности воспроизведения процессов. Модели, успешно протестированные на множестве экспериментальных участков, могут использоваться как соответствующие блоки климатических моделей, а также как независимое средство для изучения теплового и водного баланса.

2. Проведено несколько серий экспериментов по исследованию организации энерговлагообмена в масштабах времени от суток до нескольких лет, и в пространственных масштабах от десятков до тысяч километров.

3. Решающую роль во временной организации энерговлагообмена во всех исследованных природных зонах Земли играет сезонный ход метеорологических параметров, задавая основную составляющую упорядоченности потоков тепла и влаги во внутригодовом масштабе.

4. Межсуточная упорядоченность оказывает чрезвычайно важное влияние на организацию тепло- и влагообмена во времени. Главная роль в межсуточной изменчивости энерговлагообмена принадлежит режиму выпадения осадков.

5. Разработаны показатели, позволяющие формализовать описание структуры теплового и водного баланса в различных масштабах времени и пространства на основе модельных переменных. Для сезонных колебаний это показатель соотношения ресурсов тепла и влаги (РТВ), отличающийся от индекса сухости М.И.Будыко учётом сезонных колебаний в соотношении тепла и влаги. Для межсуточных вариаций введено понятие преобладающего

потока энерговлагообмена, позволяющее описать структуру тепло- и влагооборота, частично избавляясь от зависимости от специфики конкретных моделей.

6. Показатель РТВ позволяет характеризовать отдельные сезоны, конкретные годы и десятилетия с точки зрения увлажнения суши. На основе показателя РТВ разработаны базовая классификация энерговлагообмена на суше, а также принципы его динамических классификаций. В период современного потепления отмечено повышение увлажнения на большей части Северной Евразии по сравнению с предыдущими десятилетиями.

7. Предложены показатели упорядоченности вариаций энерговлагообмена в различных масштабах времени и пространства. Для оценки сезонной упорядоченности предложены среднеквадратическое отклонение (СКО) индекса РТВ, вычисленное в течение года по 12 среднемесячным значениям, либо СКО соотношения радиационного баланса и осадков. Для вариаций синоптического масштаба это частота смены преобладающих потоков, либо частота смены типов погоды во времени или в пространстве.

8. Максимумы среднегодовых значений индекса РТВ в Северной Евразии формируются в пустынях Средней и Центральной Азии за счёт высоких летних значений, а минимумы – в тундровых районах Субарктики вследствие низких значений индекса в течение всего года. В этих же районах наблюдаются соответственно наибольшая и наименьшая сезонная изменчивость индекса РТВ.

9. Отношение Боуэна в тёплый сезон обратно пропорционально числу межсуточных смен преобладающих потоков энерговлагообмена или типов погоды, до некоторого критического значения числа смен. При его дальнейшем росте (чаще 1 раза в 3 дня) структура теплового баланса практически не меняется.

10. Зависимость коэффициента стока от показателей межсуточной упорядоченности в тёплый сезон может иметь разный характер для

засушливых и влажных условий. При общем недостатке влаги учащение смен типов погоды ведёт к росту коэффициента стока, а при избыточном увлажнении – к уменьшению.

11. Пространственная упорядоченность свойств растительности и почвы играет подчинённую роль по сравнению с временной упорядоченностью метеорологических параметров в масштабах как сезонных вариаций, так и синоптических процессов. В то же время, знание географических различий в свойствах ландшафтов позволяет существенно улучшить точность расчётов теплового и водного баланса.

12. Пространственная и временная упорядоченность энерговолагообмена эквивалентны друг другу в масштабе синоптической изменчивости. Отношение Боуэна падает с уменьшением очагов однородных погодных условий до размера около 80-100 км, после которого практически не меняется. В тёплый сезон уменьшение размера очагов ведёт к росту коэффициента стока, а в холодный – к его падению. При этом пространственная упорядоченность энерговолагообмена сказывается на его составляющих лишь во временных масштабах от нескольких дней и более.

Таким образом, в настоящей работе решена **важная научная проблема**: установлены закономерности формирования упорядоченных структур энерговолагообмена на суше в различных масштабах времени и пространства. Это позволяет изучать динамику тепло- и влагооборота на суше с новых позиций при появившихся возможностях массовых вычислений составляющих теплового и водного баланса. Обоснована возможность оценки теплового и водного баланса территорий на основе упорядоченности параметров для ситуаций, когда детальные вычисления энерговолагообмена невозможны в силу слабой обеспеченности данными. Разработанный подход позволяет прогнозировать структуру теплового и водного баланса, а в первом приближении – и частоту экстремальных событий в тепло- и влагообороте для определённых сценариев будущих изменений климата. Полученные результаты показывают возможность

разработки относительно несложных процедур для анализа большого числа экспериментов на моделях локального энергообмена.

Полученные результаты позволяют высказать некоторые пожелания к численным моделям климата и другим методам расчётов климатических величин. Главное из них – кардинальное улучшение воспроизведения осадков в климатических моделях как по абсолютным величинам, так и по их распределению в пространстве и времени. Кроме того, необходимо усовершенствовать описание наиболее важных из них, кардинально меняющих систему энергообмена (влагооборот в почве, появление и эволюция снежного покрова, поведение мёрзлых почв и грунтов, и т.д.). При этом требования к точности параметров растительности и почвы могут быть не слишком строгими, поскольку их роль оказывается менее значимой по сравнению с метеорологическими факторами.

Можно сделать вывод о желательности широкого применения моделей энергообмена и развитии различных моделей этого класса для оценок процессов преобразования энергии и влаги, происходящих на поверхности суши, т.е. именно в среде обитания человека. Общие оценки, выполняемые лишь на основе глобальных моделей климата (например, оценка годового стока по разности осадков и испарения, и т.д.) имеют лишь ограниченные возможности для применения. Перспективным можно считать и применение процедур детализации (даунскейлинга) и других методов, позволяющих точнее описать пространственно-временное распределение осадков, облачности и других метеорологических параметров.

IV. ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМАТИКЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Шмакин А.Б. Тепловой баланс различных типов подстилающей поверхности в равнинных и горных условиях. «Материалы метеорологических исследований», 1988, № 14, с. 8-22.
2. Шмакин А.Б. Особенности теплового баланса в перспективных для курортного и рекреационного освоения местностях Северного Кавказа. «Курортные ресурсы и их рациональное использование», Пятигорск, 1989, с. 47-51.

3. Shmakin A.B., M.D.Ananicheva. Water and heat exchange on different types of landsurface on the northern slope of the Central Caucasus. "Regionalization in Hydrology" (ed.by M.A.Beran, M.Brilly, A.Becker, O.Bonacci). Proceedings of International Symposium held at Ljubljana, Yugoslavia on 23-26 April 1990. IAHS Publications, 1990, No.191, pp.69-79.
4. Krenke A.N., G.M.Nikolaeva, A.B.Shmakin. The effects of natural and anthropogenic changes on heat and water budgets in the Central Caucasus, USSR. "Mountain Research and Development", 1991, Vol.11, No.3, pp.173-182.
5. Shmakin A.B., M.D.Ananicheva. The role of ruggedness in the energy balance of the surfaces of mountain massifs. "Glaciers-Ocean-Atmosphere Interactions" (ed.by V.M.Kotlyakov, A.Ushakov, A.Glazovsky). Proceedings of International Symposium held at St.Petersburg, Russia, on 24-29 September 1990. IAHS Publications, 1991, No.208, pp.377-384.
6. Шмакин А.Б. Экспериментальные исследования теплового баланса основных типов растительности на северном склоне Центрального Кавказа. «Материалы метеорологических исследований», 1992, № 15, с. 4-14.
7. Шмакин А.Б., Михайлов А.Ю. Математическое моделирование теплового баланса горной территории в мезомасштабе. «Материалы метеорологических исследований», 1992, № 15, с. 14-24.
8. Shmakin A.B., A.Yu.Mikhailov and S.A.Bulanov. Parameterization scheme of the land hydrology considering the orography at different spatial scales. "Exchange Processes at the Land Surface for a Range of Space and Time Scales" (ed. by H.-J.Bolle, R.A.Feddes, J.D.Kalma). Proceedings of the Yokohama Symposium, July 1993. IAHS Publication, 1993, No.212, pp.569-575.
9. Shmakin A.B., Rubinstein K.G. and Bulanov S.A. Influence of large-scale river runoff onto global climate system: results of GCM numerical experiments. «International Conference on Water Resources & Environment Research, October 29-31, 1996, Kyoto, Japan». Proceedings, Volume 1, pp. 213-220.
10. Chen T.H., A. Henderson-Sellers, P.C.D. Milly, A.J. Pitman, A.C.M. Beljaars, J. Polcher, F. Abramopoulos, A. Boone, S. Chang, F. Chen, Y. Dai, C.E. Desborough, R.E. Dickinson, L. Dumenil, M. Ek, J.R. Garratt, N. Gedney, Y.M. Gusev, J. Kim, R. Koster, E.A. Kowalczyk, K. Laval, J. Lean, D. Lettenmaier, X. Liang, J.-F. Mahfouf, H.-T. Mengelkamp, K. Mitchell, O.N. Nasonova, J. Noilhan, A. Robock, C. Rosenzweig, J. Schaake, C.A. Schlosser, J.-P. Schulz, Y. Shao, A.B. Shmakin, D.L. Verseghy, P. Wetzell, E.F. Wood, Y. Xue, Z.-L. Yang, Q. Zeng. Cabauw experimental results from the project for intercomparison of land-surface parameterization schemes (PILPS). "Journal of Climate", 1997, Vol.10, No.6, pp. 1194-1215.
11. Шмакин А.Б. Методика параметризации свойств рельефа и гидрологического цикла для крупномасштабных климатических моделей

- и расчётов. «Материалы метеорологических исследований», 1997, № 16, с. 25-52.
12. Shmakin A.B., A.Y.Mikhailov, S.A.Bulanov. Combined parameterization of orography-induced precipitation and runoff for regional hydroclimatic studies. "Proceedings of the International Conference on Ecohydrology of High Mountain Areas, Kathmandu, Nepal, 24-28 March 1996", ICIMOD, 1998, pp. 207-218.
 13. Weiqing Qu, A. Henderson-Sellers, A.J. Pitman, T.H. Chen, F. Abramopoulos, A.Boone, S. Chang, F. Chen, Y. Dai, R.E. Dickinson, L. Dumenil, M. Ek, N. Gedney, Y.M.Gusev, J. Kim, R. Koster, E.A. Kowalczyk, J. Lean, D. Lettenmaier, X. Liang, J.-F.Mahfouf, H.-T. Mengelkamp, K. Mitchell, O. N. Nasonova, J. Noilhan, A. Robock, C.Rosenzweig, J. Schaake, C.A. Schlosser, J.-P. Schulz, A.B. Shmakin, D.L. Verseghy, P.Wetzel, E.F. Wood, Z.-L. Yang, Q. Zeng. Sensitivity of latent heat flux from PILPS land-surface schemes to perturbations of surface air temperature. "Journal of the Atmospheric Sciences", 1998, Vol. 55, No. 11, pp. 1909-1927.
 14. Shmakin A.B. Parameterization of cryologic processes for large-scale atmospheric models. In: Harding R.J. (Ed.) "Hydrology in a Changing Environment. Volume 1". J. Wiley and Sons, 1998, pp. 117-124.
 15. Rubinstein K., A.B.Shmakin. Changes of hydrological cycles in land and atmosphere in Europe and Asia in case of deforestation in Siberia (results of GCM numerical experiments). "Proceedings of the Second International Conference on Climate and Water. Espoo, Finland, 17-20 August 1998, Volume 1", pp. 233-240.
 16. Shmakin A.B. The updated version of SPONSOR land surface scheme: PILPS-influenced improvements. "Global and Planetary Change", 1998, Vol. 19, No. 1-4, pp. 49-62.
 17. Wood E.F., Lettenmaier D.P., Liang X., Lohmann D., Boone A., Chang S., Chen F., Dai Y., Dickinson R.E., Duan Q., Ek M., Gusev Y.M., Habets F., Irannejad P., Koster R., Mitchell K.E., Nasonova O.N., Noilhan J., Schaake J., Schlosser A., Shao Y., Shmakin A.B., Verseghy D., Warrach K., Wetzel P., Xue Y., Yang Z.-L., Zeng Q.-C. The project for intercomparison of land-surface parameterization schemes (PILPS) phase 2(c) Red - Arkanzas River Basin experiment: 1. Experiment description and summary intercomparisons. "Global and Planetary Change", 1998, Vol. 19, No. 1-4, pp. 115-135.
 18. Liang X., Wood E.F., Lettenmaier D.P., Lohmann D., Boone A., Chang S., Chen F., Dai Y., Desborough C., Dickinson R.E., Duan Q., Ek M., Gusev Y.M., Habets F., Irannejad P., Koster R., Mitchell K.E., Nasonova O.N., Noilhan J., Schaake J., Schlosser A., Shao Y., Shmakin A.B., Verseghy D., Warrach K., Wetzel P., Xue Y., Yang Z.-L., Zeng Q.-C. The project for intercomparison of land-surface parameterization schemes (PILPS) phase 2(c) Red - Arkanzas River Basin experiment: 2. Spatial and temporal analysis of energy fluxes. "Global and Planetary Change", 1998, Vol. 19, No. 1-4, pp. 137-159.

19. Lohmann D., Lettenmaier D.P., Liang X., Wood E.F., Boone A., Chang S., Chen F., Dai Y., Desborough C., Dickinson R.E., Duan Q., Ek M., Gusev Y.M., Habets F., Irannejad P., Koster R., Mitchell K.E., Nasonova O.N., Noilhan J., Schaake J., Schlosser A., Shao Y., Shmakin A.B., Verseghy D., Warrach K., Wetzel P., Xue Y., Yang Z.-L., Zeng Q.-C. The project for inter-comparison of land-surface parameterization schemes (PILPS) phase 2(c) Red - Arkanzas River Basin experiment: 3. Spatial and temporal analysis of water fluxes. "Global and Planetary Change", 1998, Vol. 19, No. 1-4, pp. 161-179.
20. Шмакин А.Б. Параметризация процессов в снежном покрове, в промерзающей и оттаивающей почве для моделей климата. «Метеорология и гидрология», 1999, № 2, с. 32-44.
21. Шмакин А.Б., К.Г.Рубинштейн. Оценки сезонного хода крупномасштабного речного стока в глобальной модели общей циркуляции атмосферы Гидрометцентра России. «Метеорология и гидрология», 1999, № 4, с. 47-59.
22. Pitman A.J., A.Henderson-Sellers, C.E.Desborough, Z.-L.Yang, F.Abramopoulos, A.Boone, R.E.Dickinson, N.Gedney, R.Koster, E.Kowalczyk, D.Lettenmaier, X.Liang, J.-F.Mahfouf, J.Noilhan, J.Polcher, W.Qu, A.Robock, C.Rozenzweig, C.A.Schlosser, A.B.Shmakin, J.Smith, M.Suarez, D.Verseghy, P.Wetzel, E.Wood, Y.Xue. Key results and implications from phase (1c) of the Project for Intercomparison of Land-surface Parameterization Schemes. "Climate Dynamics", 1999, vol.15, No.9, pp. 673-684.
23. Schlosser C.A., Slater A.G, Robock A., Pitman A.J., Vinnikov K.Ya., Henderson-Sellers A., Speranskaya N.A., Mitchell K., Boone A., Braden H., Chen F., Cox P., de Rosnay P., Desborough C.E., Dickinson R.E., Dai Y.-J., Duan Q., Entin J., Etchevers P., Gedney N., Gusev Y.M., Habets F., Kim J., Koren V., Kowalczyk E., Nasonova O.N., Noilhan J., Schaake J., Shmakin A.B., Smirnova T. G., Verseghy D., Wetzel P., Xue Y., Yang Z.-L. Simulations of a boreal grassland hydrology at Valdai, Russia: PILPS Phase 2(d). "Monthly Weather Review", 2000, Vol. 128, No. 2, pp. 301-321.
24. К.Г.Рубинштейн, Е.Н.Егорова, А.Б.Шмакин. Региональные изменения гидрологического баланса суши и атмосферы при сведении лесов в Сибири (результаты численных экспериментов на модели глобальной атмосферной циркуляции Гидрометцентра России) «Проблемы гидрометеорологии и окружающей среды на пороге XXI века. Труды международной теоретической конференции, Санкт-Петербург, 24-25 июня 1999 г.» СПб, Гидрометеоиздат, 2000, с.200-216.
25. Slater A.G., C.A.Schlosser, C.E.Desborough, A.J.Pitman, A.Henderson-Sellers, A.Robock, K.Ya.Vinnikov, K.Mitchell, A.Boone, H.Braden, F.Chen, P.M.Cox, P.de Rosnay, R.E.Dickinson, Y.-J.Dai, Q.Duan, J.Entin, P.Etchevers, N.Gedney, Ye.M.Gusev, F.Habets, J.Kim, V.Koren, E.A.Kowalczyk, O.N.Nasonova, J.Noilhan, S.Schaake, A.B.Shmakin, T.G.Smimova, D.Verseghy, P.Wetzel, Y.Xue, Z.-L.Yang, Q.Zeng. The

- representation of snow in land surface schemes: results from PILPS 2(d). "Journal of Hydrometeorology", 2001, Vol.2, No.1, pp.7-25.
26. van Dam T., J.Wahr, P.C.D.Milly, A.B.Shmakin, G.Blewitt, D.Lavallee, K.M.Larson. Crustal displacements due to continental water loading. "Geophysical Research Letters", 2001, Vol.28, No.4, pp.651-654.
 27. Шмакин А.Б., Кренке А.Н., Михайлов А.Ю., Турков Д.В. Роль ландшафтной структуры поверхности суши в климатической системе. "Известия РАН, серия географическая", 2001, №4, с. 38-43.
 28. Milly P.C.D., Shmakin A.B. Global modeling of land water and energy balances: 1. The Land Dynamics (LaD) model. "Journal of Hydrometeorology", 2002, Vol.3, No.3, pp.283-300.
 29. Milly P.C.D., Shmakin A.B. Global modeling of land water and energy balances: 2. Land-characteristic contributions to spatial variability. "Journal of Hydrometeorology", 2002, Vol.3, No.3, pp.301-310.
 30. Shmakin A.B., Milly P.C.D., Dunne K.A. Global modeling of land water and energy balances: 3. Interannual variability. "Journal of Hydrometeorology", 2002, Vol.3, No.3, pp.311-321.
 31. Shmakin A.B. Modeling the long-term trends in water balance components in moderate latitudes due to global climate change. PUB: Kick-off workshop of the IAHS decade on Prediction in Ungaged Basins, Brasilia, Brazil, 20-22 November 2002. Communications, pp. 376-382.
 32. Luo L., A.Robock, K.Ya.Vinnikov, C.A.Schlosser, A.G.Slater, A.Boone, H.Braden, P.Cox, P.de Rosnay, R.E.Dickinson, Y.Dai, Q.Duan, P.Etchevers, A.Henderson-Sellers, N.Gedney, Ye.M.Gusev, F.Habets, J.Kim, E.Kowalczyk, K.Mitchell, O.N.Nasonova, J.Noilhan, A.J.Pitman, J.Schaake, A.B.Shmakin, T.G.Smirnova, P.Wetzel, Y.Xue, Z.-L.Yang, Q.-C.Zeng. Effects of frozen soil on soil temperature, spring infiltration, and runoff: results from the PILPS 2(d) experiment at Valdai, Russia. "Journal of Hydrometeorology", 2003, Vol.4, No.2, pp.334-351.
 33. Шмакин А.Б., Попова В.В. Влияние Северо-Атлантического колебания на многолетний гидротермический режим Северной Евразии: II. Моделирование внутривековых колебаний теплового и водного баланса «Метеорология и гидрология», 2003, №6, с.59-68.
 34. Bowling L.C., D.P.Lettenmaier, B.Nijssen, L.P.Graham, D.B.Clark, M.E.Maayar, R.Essery, S.Goers, Ye.M.Gusev, F.Habets, B. van den Hurk, J.Jin, D.Kahan, D.Lohmann, X.Ma, S.Mahanama, D.Mocko, O.Nasonova, G.-Y.Niu, P.Samuelsson, A.B.Shmakin, K.Takata, D.Verseggy, P.Viterbo, Y.Xia, Y.Xue, Z.-L.Yang. Simulation of high latitude hydrological processes in the Torne-Kalix basin: PILPS Phase 2(e). 1: Experiment description and summary intercomparisons. "Global and Planetary Change", 2003, 38(1-2), pp.1-30.
 35. Nijssen B., Bowling L.C., D.P.Lettenmaier, D.B.Clark, M.E.Maayar, R.Essery, S.Goers, Ye.M.Gusev, F.Habets, B. van den Hurk, J.Jin, D.Kahan, D.Lohmann, X.Ma, S.Mahanama, D.Mocko, O.Nasonova, G.-Y.Niu, P.Samuelsson, A.B.Shmakin, K.Takata, D.Verseggy, P.Viterbo, Y.Xia, Y.Xue, Z.-L.Yang. Simulation of high latitude hydrological processes in the Torne-

- Kalix basin: PILPS Phase 2(e). 2: Comparison of model results with observations. "Global and Planetary Change", 2003, 38(1-2), pp.31-53.
36. Boone A., F. Habets, J. Noilhan, D. Clark, P. Dirmeyer, S. Fox, Y. Gusev, I. Haddeland, R. Koster, D. Lohmann, S. Mahanama, K. Mitchell, O. Nasonova, G.-Y. Niu, A. Pitman, J. Polcher, **A.B. Shmakin**, K. Tanaka, B. van den Hurk, S. Verant, D. Verseghy, P. Viterbo, Z.-L. Yang. The Rhone-Aggregation land surface scheme intercomparison project: an overview. "Journal of Climate", 2004, Vol.17, No.1, pp. 187-208.
 37. Shmakin A.B. Evaluation of snow cover and permafrost features in Northern Eurasia for some climate change scenarios. ACSYS Final Science Conference "Progress in Understanding the Arctic Climate System: The ACSYS Decade and Beyond", 11-14 November 2003, St.Petersburg. WCRP-118 (CD), WMO/TD No.1232, 2004, ext_s4_shmakin.pdf
 38. Etchevers P., E. Martin, R. Brown, C. Fierz, Y. Lejeune, E. Bazile, A. Boone, Y.-J. Dai, R. Essery, A. Fernandez, Y. Gusev, R. Jordan, V. Koren, E. Kowalczyk, O. Nasonova, R.D. Pyles, A. Schlosser, **A.B. Shmakin**, T.G. Smirnova, U. Strasser, D. Verseghy, T. Yamazaki, Z.-L. Yang. Validation of the energy budget of an alpine snowpack simulated by several snow models (SnowMIP project). "Annals of Glaciology", 2004, v.38, pp. 150-158.
 39. Шмакин А.Б. Сезонная организация регионального энерговлагообмена суши с атмосферой. «Известия РАН, серия географическая», 2006, № 5.

