

*В.А. Кузьмин, Р.Е. Ванкевич, К.В. Шеманаев*

**ОЦЕНИВАНИЕ УВЛАЖНЕННОСТИ ВОДОСБОРА ПО ДАННЫМ  
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ, НАЗЕМНЫХ  
ГИДРОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ СТОКА**

*V.A. Kuzmin, R.E. Vankevich, K.V. Shemanaev*

**ASSESSING CATCHMENT MOISTURE CONTENT BY USING REMOTELY  
SENSED DATA, IN SITU OBSERVATIONS AND MATHEMATICAL  
STREAMFLOW MODELLING**

*Рассмотрены способы оценивания увлажненности речных водосборов, выполняемого при автоматизированном мониторинге рисков возникновения лесных, торфяных и степных пожаров, источники необходимой для этого информации, а также ключевые элементы стратегии минимизации ущерба, наносимого лесными и торфяными пожарами.*

*Ключевые слова: лесные и торфяные пожары, увлажненность водосбора, гидрологическое моделирование, параметры состояния, влажность почвы.*

*Several ways of assessing river catchments moisture content performed in frameworks of the automatic wildfire risk monitoring, data sources, and key elements of the strategy to minimize losses caused by wildfires are considered in this paper.*

*Key words: wildfires, catchment moisture content, hydrological modelling, model states, soil moisture.*

## **1. Общие сведения**

В настоящее время в РГГМУ выполняется ряд проблемно-ориентированных поисковых исследований в рамках разработки комплекса технологий мониторинга и прогнозирования состояния атмосферы при лесных, торфяных и степных пожарах (рис. 1). Одной из составных частей этого комплекса является автоматическое оценивание риска возникновения лесных и торфяных пожаров как функции состояния подстилающей поверхности и способствующих возгоранию метеорологических условий.

Риск и опасность лесных, торфяных и степных пожаров (как возникших в результате сухих гроз, так и вызванных антропогенными причинами – умышленным поджогом, непогашенным костром, «случайной» искрой на линии электропередач) определяются увлажненностью рассматриваемой территории, температурой и влажностью воздуха, а также показателями пожарной опасности растительного покрова и подстилающей поверхности – горючестью, воспламеняемостью, дымообразующей способностью, интенсивностью распространения пламени и токсичностью [1-5]. Данная статья посвящена лишь первому из перечисленных факторов, а именно – способам оценивания увлажненности водосбора по данным дистанционного зондирования, наземных гидрометрических наблюдений и математического моделирования

стока. Эту же задачу необходимо решать в оперативном режиме при осуществлении специализированного гидрометеорологического обеспечения гидроэнергетики, железнодорожного транспорта и других отраслей экономики нашей страны.

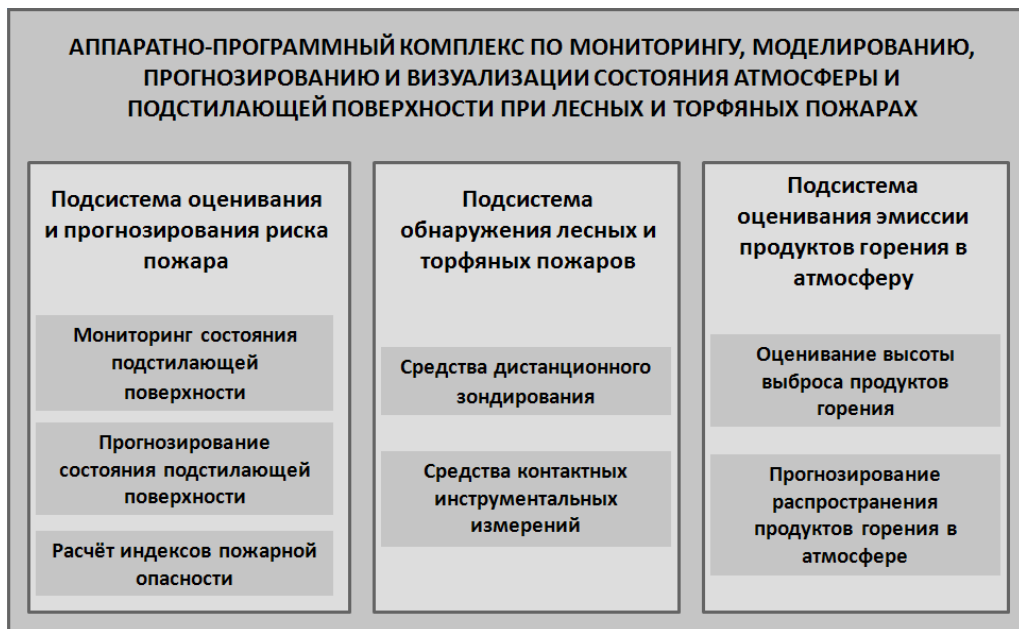


Рис. 1 — Структура и состав разрабатываемого в РГГМУ комплекса технологий по мониторингу, моделированию, прогнозированию и визуализации состояния подстилающей поверхности и атмосферы при лесных и торфяных пожарах

## 2. Стратегии минимизации ущерба, наносимого лесными, торфяными и степными пожарами

На сегодняшний день в различных странах функционируют несколько систем мониторинга пожарной опасности. Наиболее хорошо известными и проверенными на практике системами мониторинга природных пожаров являются Европейская система информации о пожарах (The European Forest Fire Information System) [6], Канадская система оценивания пожарной опасности (Canadian Forest Fire Danger Rating System CFFDRS) [7], Национальные системы оценивания пожарной опасности США (NFDRS и более современная WFAS) [4, 5, 8, 9] и система оценивания пожарной опасности Мак-Артура (McArthur Forest Fire Danger Index) в Австралии [10]. Динамические (регулярно обновляемые) базы данных этих систем содержат всю необходимую информацию, необходимую для анализа рисков возникновения пожаров: длинные временные ряды наблюдений за возникновением пожаров, наблюдения на метеорологических станциях, а также большой объем дополнительной информации, такой как мелкомасштабные карты покрытия земной поверхности, топографические данные и цифровые модели рельефа.

Важно заметить, что эффективное функционирование таких систем в оперативном режиме соответствует первой из двух стратегий принятия противопожарных мер, проиллюстрированных на рис. 2. При наличии экономической и социальной целесообразности (например, в густонаселенных промышленных районах) основные инвестиции носят превентивный характер: средства вкладываются в постоянный инструментальный мониторинг как факторов, определяющих риск пожара, так и самих очагов возгорания. В связи с тем, что очаги возгорания в этом случае можно обнаружить на ранней стадии распространения пожара, его эффективная ликвидация может быть проведена адресно, быстро и сравнительно недорого. Однако существует некоторый риск, что инвестиции в инструментальный мониторинг не окупятся, поскольку пожар может так и не возникнуть, прежде чем установленный инструментальный исчерпает свой ресурс.

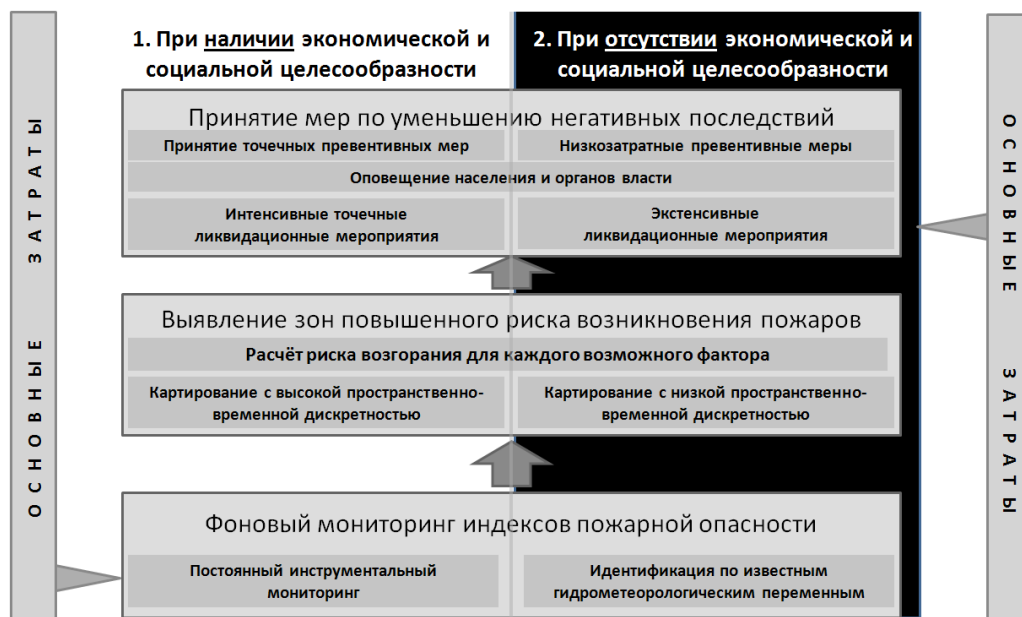


Рис. 2 — Две стратегии противопожарных мер

При отсутствии экономической и социальной целесообразности (например, в малонаселенных районах или районах с низкой стоимостью земельных угодий) основные инвестиции делаются a posteriori, когда лесной или торфяной пожар уже является фактом. Такая политика также характерна для стран с недостаточно эффективной системой государственного управления, которая не подразумевает оптимизацию расходования государственных средств за многолетний период времени и допускает формирование паразитических коррупционных подсистем, поскольку высокая неопределенность пространственно-временного распределения пожара автоматически означает потерю финансового контроля над расходуе-

мыми ресурсами. По мере экономического роста и усиления системы управления приходит понимание того факта, что превентивные противопожарные меры — это более эффективный путь уменьшения негативных последствий лесных и торфяных пожаров, и прежде всего — последствий социально-гуманитарных, поскольку он обеспечивает более высокий уровень противопожарной безопасности населённых пунктов.

Что касается нашей страны, то она занимает некое промежуточное положение: в густонаселенных промышленных районах, преимущественно расположенных в европейской части, несомненно, целесообразно применение первой — «превентивной» — стратегии, а в отдаленных малонаселенных районах Сибири и Дальнего Востока — второй, «апостериорной». Высокий уровень неоднородности экономической ценности различных регионов России, к сожалению, не позволяет применять единую стратегию принятия противопожарных мер на всей территории страны. Тем не менее, можно сформулировать основные принципы стратегии снижения ущерба от лесных, торфяных и степных пожаров, которая может быть одобрена на федеральном уровне и затем применена различными регионами вне зависимости от уровня их экономического благополучия:

- 1) в целях обеспечения высокоточного мониторинга лесных и торфяных пожаров потребуются развитие наземной сети недорогих инструментальных средств наблюдения за ключевыми характеристиками подстилающей поверхности в пожароопасных районах, а также соответствующих технологий обработки получаемой информации;
- 2) в связи с высокой долей лесных и торфяных пожаров, вызванных антропогенными причинами (включая умышленный поджог), потребуются создание законодательно базы государственной системы противопожарного страхования. Это позволит уменьшить число умышленных поджогов, совершаемых с целью получения компенсации от государства или скрыть незаконную вырубку леса, снизить нагрузку на федеральный и местные бюджеты и привлечь дополнительные средства на развитие сети противопожарного мониторинга. В свою очередь, для создания такой сети потребуются создание комплекса новых технологий по производству измерений и обработке полученных данных.
- 3) при комплексном подходе к дальнейшему развитию системы национальной безопасности РФ, включающей подсистемы (например, государственные, ведомственные и отраслевые службы) мониторинга и прогнозирования опасных природных явлений потребуются интегрирование этих подсистем и оптимизация их функционирования. Для этого необходимо разработать фундаментальную научную и законодательную базу, методики комплексного функционирования подсистем, а также техническое и управленческое программное обеспечение.

Рассмотренные ниже способы оценивания увлажненности речных водосборов, выполняемого при автоматизированном мониторинге рисков возникновения лесных, торфяных и степных пожаров, целиком и полностью соответствуют приведенной концепции.

### 3. Оценивание увлажненности территории по спутниковым данным

Спутниковые данные дистанционного зондирования атмосферы и поверхности Земли широко используются для решения целого ряда задач, связанных с мониторингом природных пожаров [11, 12]. Так, например, для оперативного детектирования очагов возгорания и расчета эмиссии газообразных продуктов горения в атмосферу наиболее подходящими являются системы низкоорбитальных спутников программы EOS (Earth Observation System) имеющих в составе бортового оборудования спектрорадиометр MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) [13, 14], обеспечивающих детектирование следующих признаков, подтверждающих наличие действующего пожара:

- 1) наличие на месте обнаружения пожара гари, автоматически детектируемой по данным SPOT VGT;
- 2) наличие на месте обнаружения пожара гари, визуально детектированной по данным MODIS;
- 3) наличие визуально детектируемых дымов;
- 4) детектирование пожаров в одном и том же районе на нескольких последовательных сеансах спутников TERRA, AQUA и NOAA [11, 13, 15].

Заметим, что эти спутниковые наблюдения позволяют получать и другую важную с точки зрения мониторинга пожаров и оценивания риска пожарной опасности информацию (таблица 1), например, данные о влажности и температуре верхнего слоя почвы и растительности. Такие данные охватывают сравнительно крупные территории, но при этом не отличаются высокой точностью, поэтому для дальнейшего использования они обязательно пройти процедуру ассимиляции (усвоения) с использованием данных наземных наблюдений, рассмотренных в следующем разделе.

Таблица 1

**Виды (диапазоны) дистанционного зондирования, применяемые для определения влажности и других характеристик верхнего слоя почвы**

Диапазон ДЗ	Переменная	Достоинства	Недостатки	Источники шумов	Датчики
Видимый	Альbedo почвы	Простота, хорошее покрытие	Множество источников шумов	Двумерная функция рас-пределения отражательной способности объектов, облачность, цвет почвы, растительность	AVHRR MODIS Landsat SPOT
Коротковолновый инфракрасный	Влажность почвы и растительности	Очень чувствителен по отношению к влажности почвы	Существенное влияние сигнала, отражающего влажность почвы	Облачность, растительный покров	MODIS ASTER

Диапазон ДЗ	Переменная	Достоинства	Недостатки	Источники шумов	Датчики
Тепловой инфракрасный	Температура поверхности	Высокое разрешение, широкая полоса захвата, хорошее покрытие, высокая частота наблюдений, физическая реалистичность	Ширина покрытия и частота наблюдений ограничены облачностью	Метеоусловия	IR-MSS AVHRR MODIS
Активный микроволновый	Коэффициент обратного рассеяния, диэлектрические характеристики	Низкий уровень атмосферных шумов, высокое разрешение	Ограниченная полоса захвата	Шероховатость и рельеф поверхности Земли, растительный покров	ERS-Scatterometer
Пассивный микроволновый	Яркость, температура почвы, диэлектрические характеристики	Низкий уровень атмосферных шумов, высокая проникаемость через слой растительности	Низкое разрешение, подверженность радиопомехам	Шероховатость поверхности Земли, растительность, температура, средства связи	SMMR AMSR-E SMOS Hydros

Обозначения датчиков:

AVHRR – Advanced Very High Resolution Radiometer

MODIS – MODerate resolution Imaging Spectroradiometer

Landsat – программаспутниковыхнаблюдений, проводимаяNASAиUSGS

SPOT – французская программа спутникового зондирования Земли

ASTER – Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

IR-MSS – Infrared Multispectral Scanner

ERS-Scatterometer – европейский радар, работающий в С-диапазоне с пространственным разрешением около 50 км

SMMR – scanning multichannel microwave radiometer

AMSR-E – Advanced Microwave Scanning Radiometer - Earth observing system

SMOS – SoilMoistureandOceanSalinity (европейская программа спутникового зондирования Земли)

Hydros – HYDRosphere State mission (программа NASA по спутниковому зондированию Земли)

#### **4. Оценивание увлажненности территории по данным наземных наблюдений**

##### **4.1. Инструментальный мониторинг**

Как было отмечено выше, мониторинг почвенной влаги может осуществляться как при помощи непосредственных инструментальных наблюдений с использова-

нием широкого спектра представленных на рынке сенсоров и логгеров (например, выпускаемых британской фирмой «Delta-T», которые показаны на рис. 3), так и на основе не прямой идентификации, выполняемой путём расчёта по данным о других гидрометеорологических переменных.

Инструментальный мониторинг почвенной влаги целесообразно производить с целью получения фактических данных о состоянии почвы орошаемых сельскохозяйственных угодий, поскольку во многих странах ответственность за сохранность установленных сенсоров и логгеров несут землевладельцы и арендаторы, заинтересованные в оптимальном расходовании воды. Поэтому в США, Австралии, Новой Зеландии, Канаде и некоторых других странах плотность контактных наблюдений за влажностью почвы весьма высока. В Российской Федерации и других странах СНГ, к сожалению, подобная организация наблюдений в настоящее время не представляется возможной, поэтому в них имеет смысл размещать измерительное оборудование лишь на охраняемых территориях. Пространственная дискретность получаемых данных при этом будет сравнительно низкой и недостаточной для прогнозирования стока, однако такие данные можно будет использовать для усвоения данных авиационного и спутникового зондирования, охватывающего более крупные территории.

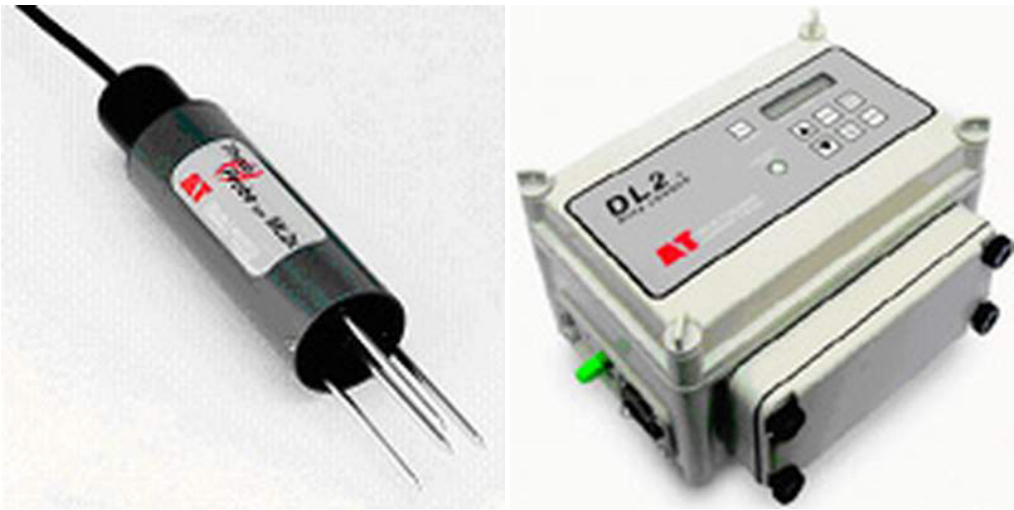


Рис. 3 — Сенсор почвенной влаги и логгер фирмы «Delta-T»

Такой способ использования скудных данных инструментального мониторинга влажности почвы является исключительно важным технологическим элементом фоновое прогнозирования стока, поскольку неусвоенные данные спутниковых измерений могут значительно отличаться от данных наземных наблюдений и поэтому для адекватного оценивания начальной увлажненности водосбора перед выпадением осадков, формирующих паводок, в своем оригинальном виде они не подходят.

### 4.2. Оценивание увлажненности водосбора по данным гидрометрических наблюдений

Одним из способов непрямой идентификации является гидрологический подход к мониторингу и прогнозированию рисков лесных пожаров.

В существующей методике гидрологического прогнозирования лесных пожаров предполагается, что величина речного стока является индикатором насыщенности влагой водосбора и, следовательно, степени влажности топлива для пожара. Лесной пожар произойдет с наибольшей вероятностью тогда, когда расход воды в реке будет ниже некоторого определенного критического значения, но это действительно не во всех случаях. Накануне больших пожаров наблюдается, как правило, низкий уровень воды, но бывают варианты, когда расходы воды в реке не так уж малы. Перед катастрофическим пожаром расход воды становится гораздо меньше, чем обычно. Но это не значит, что он может очень сильно отличаться от расхода в другие годы. А на некоторых реках во время засушливых периодов сток вообще отсутствует. Из этих примеров следует, что для оценки влажности топлива необходимо рассматривать не только величину минимального стока, но и характерные особенности кривых спада гидрографов стока. На водосборах со сложной гидрогеологической структурой кривые спада обычно слегка вогнуты и могут быть представлены несколькими прямыми линиями. При длительной засухе кривые спада становятся более крутыми, чем обычно. При этом вогнутая форма кривой может смениться на выпуклую. Обычно кривые спада прерываются небольшими дождями или моросью. В этом случае измеряют величину интенсивности спада в интервалах между дождями. Сток внезапно может прекратиться уменьшаться и будет держаться на некотором небольшом значении, несмотря на сухую погоду. Это говорит о том, что основной сток иссяк и продолжается только глубокий родниковый сток и разгрузка артезианских вод. Это означает начало критически огнеопасного периода. Сезон дождей, прерывающий засуху, обычно облегчает положение. К сожалению, из-за неравномерного характера осадков в течение сухого периода трудно оценить эффект такого дождя на основе метеорологических данных. Однако существуют простые способы определения окончания критической опасности пожара. Если после дождя расход воды восстанавливается и убывает с обычной скоростью, то непосредственная угроза большого пожара миновала. Крутой спад и возврат к величине стока до дождя означает, что дождь не дал результатов. Можно выделить две группы предикторов, определяющих пожарную опасность лесов:

А. Ранние предикторы:

- 1) низкий сток воды;
- 2) быстрый спад гидрографа стока;
- 3) изменение кривой спада от вогнутой формы к выпуклой.

В. Поздние предикторы:

- 1) стабилизация спада до величины глубокого стока;
- 2) резкий спад после промежуточных небольших дождей;
- 3) выпуклая форма кривой спада после промежуточных дождей;
- 4) резкая стабилизация спада к глубокому стоку спустя несколько дней после небольшого дождя.



В чем заключаются основные преимущества гидрологического метода прогноза по сравнению с метеорологическим?

Во-первых, гидрометрические данные, описывающие кривую спада обычно более точны и более представительны для всего водосбора, чем метеорологические измерения, определяемые по ограниченному числу станций со сравнительно низкой пространственной дискретностью.

Во-вторых, исключается необходимость определения одной из наиболее неопределенных и изменчивых метеорологических переменных – испарения, поскольку кривая спада является интегрирующей характеристикой водного баланса, отражающей, в частности, и содержание влаги в верхнем слое почвы.

В-третьих, если в какой-то день происходит ошибка в оценке интенсивности спада гидрографа стока, то она никак не влияет на определение величины спада в последующие дни. Кривая спада отражает емкость водоносных горизонтов и их способность подпитывать верхние слои почвы за счет капиллярного поднятия. Поскольку деревья могут получать воду из нижних почвенных горизонтов, то они могут пережить даже экстремальную засуху. Но когда эти внешние резервы истощаются, лес засыхает. Повышение влажности воздуха, уменьшение скорости ветра, даже морось в течение нескольких дней могут только отсрочить возникновение пожара, но не исключить его.

### **5. Оценивание увлажненности территории по данным математического моделирования стока**

Помимо описанных подходов, ВМО рекомендует оценивать увлажненность рассматриваемой территории на основе анализа «выхода» или переменных состояния концептуальных гидрологических моделей (рисунок 4), прошедших процедуру валидации параметров, определенных тем или иным способом [16], например, на основе сопоставления моделируемого и фактического стока или моделируемых и фактических значений влажности верхнего слоя почвы.

В число моделей, наилучшим образом подходящих для моделирования кривой спада уровней или расходов воды, входят модель «Сакраменто» (the Sacramento Soil Moisture Accounting Model) [17], модель «VIC» (the Variable Infiltration Capacity Macroscale Hydrologic model) [18], модель талого и дождевого стока, разработанной В.И. Корнем и В.А. Бельчиковым в начале 1980-х годов (известной также как модель Гидрометцентра) [19], австралийская воднобалансовая модель «AWBM» (the Australian Water Balance Model) [20], модель «SIMHYD» (от англ. «SIMplified HYDrograph» – упрощенный гидрограф) [21], а также модель «SMAR» (Soil Moisture Accounting Run-off model) [22].

Эти модели вполне успешно используются для моделирования стока, причём в качестве переменных состояния (states) используется количественная характеристика содержания почвенной влаги. Однако глубокий анализ этих моделей показал, что эти модели технически сложно, если вообще возможно, использовать для расчёта почвенной влаги по известному стоку (рис. 4). Поэтому возникла необходимость разработки так называемой «заместительной» концептуальной модели, ориентированной на моделирование не только стока, но и эволюции влажности верхнего слоя почвы, - модели «MLCM» (аббревиатура от англ. «Multi-Layer Conceptual Model»).

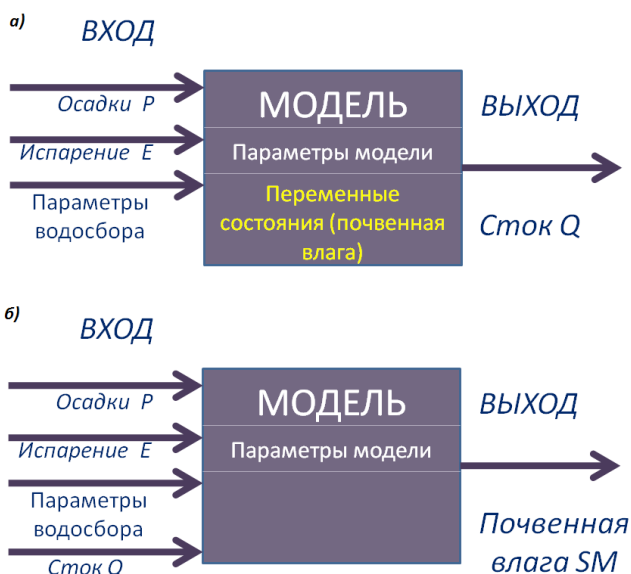


Рис. 4 — Возможность использования гидрологической модели (а) для расчёта стока по известному гидрометеорологическому «входу» и (б) для расчёта содержания почвенной влаги по обычному гидрометеорологическому «входу» и данным о стоке

Рассмотрим заместительную модель «MLCM» (версия 11.2011) более подробно.

Модель «MLCM» несколько проще модели «Сакраменто», но при этом она является более гибкой, поскольку позволяет выполнить распространение воды в двух зонах (и 5 емкостях), а в  $N$  слоях, причём значение  $N$  принципиально может быть каким угодно, оно подбирается методами оптимизации вместе с другими параметрами или задается пользователем. Как показал первый опыт моделирования стока, главным лимитирующим фактором для числа слоев  $N$  является время, которое предполагается затратить на калибровку модели, поскольку для каждого слоя должно быть задано два параметра (мощность слоя  $Z_i$  и скорость инфильтрации  $\alpha_i$ ). Учитывая скорость поверхностного стекания  $\alpha_0$ , и параметр задержки отклика  $T_R$ , отражающий поверхностное задержание воды в микро- и мезодепрессиях, общее число параметров модели  $N_p$  равно  $N_p = 2N + 2$ .

В целом же, сравнивая модели «Сакраменто» и MLCM, можно отметить их значительное сходство. В частности, обе модели:

- 1) являются воднобалансовыми и концептуальными;
- 2) учитывают основные виды потерь воды (испарение, транспирация, потери из русла);
- 3) имеют одинаковый внешний блок трансформации паводочной волны.

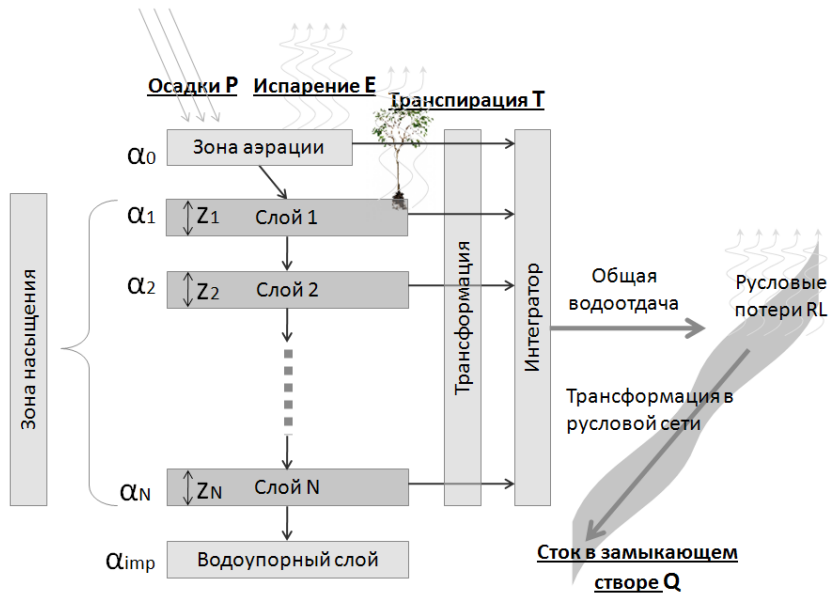


Рис. 5 — Концептуальная схема модели «MLCM» (поверхностное задержание стока на схеме не показано)

В то же время, эти модели имеют ряд существенных отличий. Во-первых, модель MLCM имеет более высокий уровень концептуализации. В модели MLCM нет разделения воды на связанную и несвязанную, а поверхностный, внутрипочвенный и базисный сток по отдельности не идентифицируются. В то же время, модель MLCM является более гибкой, поскольку число компонент стока, трансформирующихся (с различной скоростью фильтрации), является величиной переменной. Это свойство модели MLCM позволяет моделировать сток на водосборах со сложным гидрогеологическим строением. В общем случае число слоев может определяться ресурсами процессора, ограничивающими общее число параметров модели при калибровке.

Во-вторых, модель MLCM можно использовать при меньшем объеме входной информации. В частности, не требуются данные о почвогрунтах и их гидравлических свойствах, поскольку коэффициенты фильтрации каждого слоя являются независимыми параметрами и, следовательно, могут быть идентифицированы по отдельности.

В-третьих, временная дискретность модели MLCM является переменной (в отличие от базовых конфигураций модели «Сакраменто», предусматривающих дискретность 1 ч, 6 ч и 24 ч). Это очень важно при фоновом моделировании стока на больших территориях, когда может потребоваться различная дискретность (например, 10-минутная или получасовая для малых водотоков и 12-часовая или суточная для больших).

Наконец, заметим, что в модели «MLCM» количество связанной воды специальным параметром, как это делается в модели «Сакраменто», не отражается с целью сокращения числа идентифицируемых параметров. Это исключительно важно при использовании модели «MLCM» как модели с распределенными или полураспределенными

параметрами. Тем не менее, влагоудерживающая способность почвы моделью все-таки косвенно учитывается. Во-первых, для этого выполняется так называемый «прогрев» модели (warm-up), позволяющий насытить влагой все слои и достаточно адекватно отразить начальные условия. Во-вторых, погрешность, обусловленная влагоудерживающей способностью почвы, в некоторой степени учитывается параметрами  $\alpha_i$ .

Таблица 2

Входные данные заместительной модели MLCM

Тип данных	Обозначение
Осадки	$P$
Испарение*	$E$
Площадь водосбора	$S$
Длина основного русла	$L$
Средняя длина правого и левого склона	$LS_R, LS_L$
Фактический сток**	$Q$

Примечание. 1) Данные об испарении могут также отражать транспирацию и потери из русла; 2) Данные о фактическом стоке используются для калибровки модели.

Первые численные эксперименты по моделированию стока при помощи модели «MLCM» показали ее принципиальную пригодность для решения поставленной задачи, однако программное обеспечение, реализующее эту модель, нуждается в существенной доработке, необходимой для проведения массовых расчетов в полностью автоматическом режиме. Это позволит сделать окончательный вывод об эффективности применения этой модели, а также разработать программу проведения численных экспериментов, направленных на сопоставление результатов оценивания почвенной влаги при помощи подходов, описанных в данной статье. Результаты этих экспериментов будут представлены в последующих публикациях.

Работа выполнена в рамках мероприятия 1.5 Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (государственный контракт № 16.515.11.5049 от 02 июня 2011 г.)

### Литература

1. ГОСТ Р 22.1.09-99. Группа Т58. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг и прогнозирование лесных пожаров.
2. Барановский Н.В., Гришин А.М., Лоскутникова Т.П. Информационно-прогностическая система определения вероятности возникновения лесных пожаров [Текст] / Н.В.Барановский, А.М.Гришин, Т.П.Лоскутникова // Вычислительные технологии. 2003. № 2. С. 16 – 26.
3. Вонский С.М. Определение природной пожарной опасности в лесу. [Текст] / С.М. Вонский. Методические рекомендации. – Л.: ЛенНИИЛХ, 1981. 52 с.
4. Damoah, Wildland fire in ecosystems: effects of fire on flora. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station: 1-8.Vol.2, 2006.
5. Westphal and Toon, The ecology of fire. New York, NY: Cambridge University Press. 346 pp., 1991.
6. San-Miguel-Ayanz, Barbosa, P., Liberta, G., Schmuck, G., Schulte, E., Bucella, P. The European Forest Fire Information System. A European Strategy towards ForestFire Management. [Text] / San-Miguel-Ayanz, Barbosa, P., Liberta, G., Schmuck, G., Schulte, E., Bucella, P.3rd International Wildland Fire Conference and Exhibition, ITTO, Erickson Air-Crane, FMWG, 3-6 October 2003, Sydney (AUS).

7. *Taylor, S.W., Alexander, M.E.* Science, technology, and human factors in fire danger rating: the Canadian experience. [Text] / Taylor, S.W., Alexander, M.E. *Int. J. Wildland Fire* 15, 2006, 121–135.
8. *Burgan, Robert E.* 1988. 1988 revisions to the 1978 National Fire-Danger Rating System. Res. Pap. SE-273. Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station. 39 pp.
9. *Burgan, R.E., R.A. Hartford, and J.C. Eidenshink.* 1996. Using NDVI to assess departure from average greenness and its relation to fire business. [Text] / Burgan, R.E., R.A. Hartford, and J.C. Eidenshink. Gen. Tech. Rep. INT-333. Ogden, Utah, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station. 8 p.
10. *Andrew J. Dowdy, Graham A. Mills, Klara Finkele and William de Groot.* Australian fire weather as represented by the McArthur Forest Fire Danger Index and the Canadian Forest Fire Weather Index CAWCR [Текст] / CSIRO Technical Report No. 10, Canberra, June 2009.
11. Применение спутниковых данных для оценки засухи [Электронный ресурс] / : <http://ckm.iszf.irk.ru/html/missions/finerisk/index.php>
12. *Климова Е.Г., Дубровская О.А.* Вычислительные технологии оценки состояния окружающей среды по данным наблюдений Земли из космоса. - *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, Новосибирск, т. 4, №1 - 2008. — стр. 315-324.
13. Официальный веб-сайт Национального аэрокосмического агентства США [Электронный ресурс] / <http://eosps0.gsfc.nasa.gov/>
14. *L. Giglio, et al.* Algorithm Technical Background Document. MODIS fire products. Version 2.3 [Text] / L. Giglio 1 October 2006.
15. *Barrett, D., Kuzmin, V., Walker, J., McVicar, T., and Draper, C.*, Improved stream flow forecasting by coupling satellite observations, in situ data and catchment models using data assimilation methods. [Text] / D.Barrett, V.Kuzmin, J.Walker, T.McVicar and C.Draper, eWater CRC Technical Report, 2008, 77 p.
16. *Kuzmin, V., Seo, D.-J., Koren, V.*, Fast and efficient optimization of hydrologic model parameters using a priori estimates and stepwise line search, [Text] / V. Kuzmin, D.-J. Seo, V. Koren, *Journal of Hydrology*, Volume 353, Issues 1 – 2, 20 May 2008, pp. 109 – 128.
17. *Burnash, R.J.C., Ferral, R.L. and McGuire, R.A.* 1973. A generalised streamflow simulation system – conceptual modeling for digital computers. Technical Report, Joint Federal and State River Forecast Center. [Text] / R.J.C. Burnash, R.L.Ferral and R.A McGuire US NWS and California DWR, Sacramento, CA. 204 p.
18. *Liang, X.* One-dimensional statistical dynamic representation of subgrid spatial variability of precipitation in the two-layer variable infiltration capacity model [Text] / X. Liang, D.P. Lettenmaier, E. F.Wood // *Journal of Geophysical Research*. –1996.–Vol. 101(D16). –P.21,403 – 21,422.
19. *Корень, В.И.* Математические модели в прогнозах речного стока [Текст]/ В.И. Корень. — Л.: Гидрометеониздат, 1991. — 199 с.
20. *Boughton, W.* 2004. The Australian water balance model. [Text] / W.Boughton *Environmental Modelling and Software* 19: 943–956.
21. *Chiew, F.H.S.* Application and testing of the simple rainfall-runoff model SIMHYD [Text] / F.H.S. Chiew, M.C. Peel and A.W. Western // Edited by V.P. Singh and D.K. Frevert / *Mathematical models of small watershed hydrology and applications*. – Littleton, Colorado: Water Resources Publication, 2002.—P.335–367.
22. *Fazal, M.* Estimating groundwater recharge using the SMAR conceptual model calibrated by genetic algorithm [Text] / M. Fazal, M. Imaizumi, S. Ishida, T. Kawachi and T. Tsuchihara // *Journal of Hydrology*.—2005.—No. 303.—P.56 – 78.