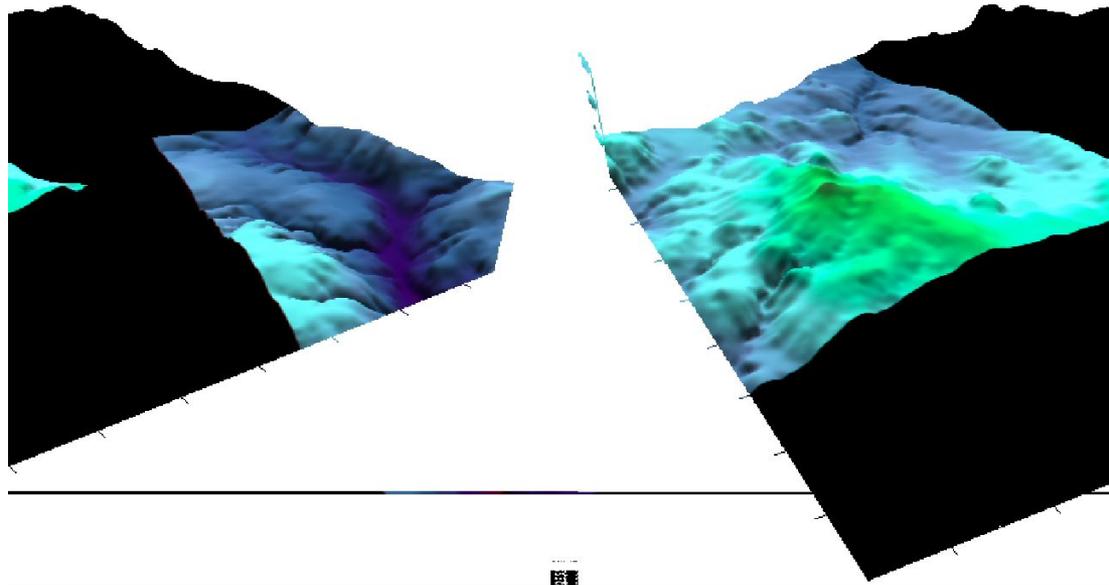


**Сысуев В.В.**

доктор географических наук, профессор

**ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЛАНДШАФТОВЕДЕНИЯ**

**Часть I**



Географический факультет

Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова

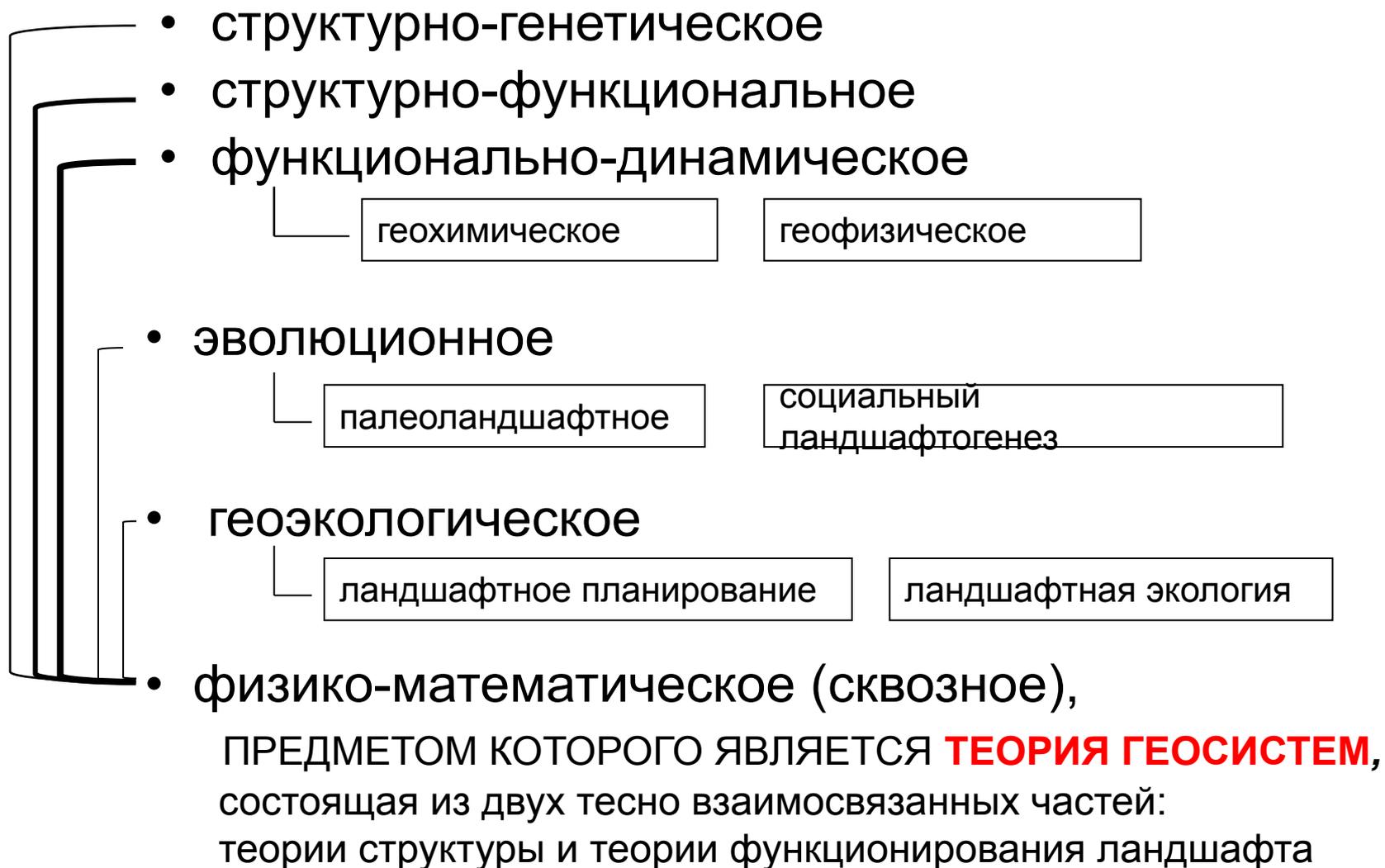
[Landrus@geogr.msu.ru](mailto:Landrus@geogr.msu.ru)

Современное ландшафтоведение –  
комплексная физико-географическая наука  
о пространственно-временной организации  
геосистем,  
наука о структуре, функционировании и эволюции  
природных и природно-антропогенных  
территориальных комплексов

**"В конечном счете, все физико-географические процессы имеют в основе физические явления. Сведение географических закономерностей к геофизическим, а по мере возможности и к физическим законам представляется крайне желательным. Только физический анализ убеждает, что явление понято»**

**[Д.Л. Арманд, 1975]**

# Направления исследования ландшафтоведения [К.Н. Дьяконов, 2004]



## ЦЕЛЬ КУРСА

охарактеризовать физико-математический подход как теоретическую основу для объединения основных направлений ландшафтоведения

## ЗАДАЧИ:

- продемонстрировать внутреннее единство теоретического описания структуры геосистем и структурообразующих процессов
- провести дедуктивное построение теории некоторых процессов в геосистемах от постулатов до уравнений математической физики, упрощение этих уравнений до практических моделей природных процессов
- показать пути реализации моделей структуры и процессов функционирования геосистем вплоть до методик измерения и расчета физических параметров
- применить теоретический подход в практических задачах ландшафтного планирования и гидрологического зонирования

## НАИБОЛЕЕ ВАЖНЫЕ МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ (РЕГУЛЯТИВЫ) НАУЧНОЙ ТЕОРИИ:

- 1) **принципиальная проверяемость:** должна быть математически сформулирована, для возможности выведения количественных следствий, допускающих сравнение с экспериментом.
- 2) **максимальная общность:** должна объяснять новые стороны явлений, непосредственно не участвовавшие при ее создании
- 3) **предсказательная сила:** должна предвидеть совершенно новые до нее и без нее неизвестные явления, и чем лучше она это делает, тем большей предсказательной силой она обладает. Это возможно лишь тогда, когда теория содержит момент объективной истины
- 4) **принципиальная простота:** исходя из минимального числа основных положений (основных, фундаментальных законов и принципов) теория должна вывести природные законы - теория должна обладать аппаратом выведения

**РАЗВИТИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ (НА ПРИМЕРЕ РЕЧНОГО СТОКА),  
В СВЯЗИ С ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ИСХОДНОЙ АПРИОРНОЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ  
(АПОСТЕРИОРНОЙ) ИНФОРМАЦИЕЙ [Кучмент, 1983]**

1. Модели, при построении которых априорная информация о структуре и параметрах гидрологической системы практически не используется: гидрологическая система рассматривается как "черный ящик";
2. Концептуальные модели стока, создаваемые при неполных и неопределенных физических представлениях о гидрологических процессах; однако ряд зависимостей и гипотетических связей уже используется при определении структуры модели и ее параметров;
3. Физико-математические модели формирования стока, основанные на достаточно полных физических представлениях и опирающиеся на измеряемые характеристики водосбора как основной территориальной системы; эти модели используют в основном априорную информацию.

**ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ПОДХОД,  
ОСНОВАННЫЙ НА ОБЩЕНАУЧНЫХ ПОНЯТИЯХ И ТЕРМИНАХ, ИМЕЕТ  
ВАЖНОЕ ЗНАЧЕНИЕ В ПЛАНЕ ВКЛЮЧЕНИЯ ЧАСТНЫХ ПРОЦЕССОВ И  
СИСТЕМ В БОЛЕЕ ОБЩИЕ ГЕОСИСТЕМЫ.**

## Основные предпосылки создания физико-математической теории геосистем

- Объективность существования ландшафтов как отображения взаимодействия комплекса компонентов
- Эмпирическая классическая теория ландшафтоведения, обобщения физической географии и синэкологии
- Наличие и доступность достаточного и необходимого математического аппарата для адекватного описания процессов и структуры ландшафтов
- Опыт физико-математического моделирования отдельных природных процессов и элементов структуры ландшафтов.
- Активное развитие использования измерительных методов и ГИС-технологий в ландшафтных исследованиях
- Необходимость прогнозирования и планирования развития природной среды в прикладных целях

**Геосистемы – открытые иерархически организованные динамические системы, и каждый уровень их иерархии представляет собой динамичную целостность с особой присущей им географической организацией** [Сочава, 1978].

Математическое определение системы-**формализация понятия связи**  
Связь всегда означает взаимодействие объектов во времени. В результате приходим к процессной точке зрения – **система представляется как взаимодействующие во времени процессы.**

В каждый момент  $t$  система характеризуется некоторым **состоянием – элементом из множества ее состояний**, которое однозначно определяет значение выхода в этот момент  $t$ , и это одна из аксиом теории систем.

Внутреннее состояние системы  $S$  в момент времени  $t$  характеризуется **множеством значений ее параметров и их производных.**

Если в понятия системы использование процессов входа и выхода было вызвано физическими представлениями о функционировании системы, то понятие состояния имеет отношение к **закону формирования выхода.**

Т.е., существует еще одна характеристика – **закон, которому подчиняется поведение системы в пространстве состояний**

# ЭТАПЫ РАЗРАБОТКИ ТЕОРИИ ГЕОСИСТЕМ

## 1. Систематизация структурообразующих геосистемных процессов

Радиальные процессы формирования элементарных геосистем	Латеральное сопряжение геосистем элементарного водосбора	Формирование структуры геосистем высоких иерархических порядков
---	--	---

## 2. Формализация пространственной структуры геосистем

Элементарные геосистемы: земная поверхность <i>в поле гравитации</i> (конвергенция-дивергенция и ускорение-замедление потоков) и <i>в поле инсоляции</i> (освещенность, доза солнечной радиации и др.)	Параметры структуры водосборов: поверхностных - линии тока, водоразделы, тальвеги, порядок водосбора и др.; подземных - почвенные и литологические горизонты и линеаменты, и др.
---	---

## 3. Создание, верификация, идентификация, параметризация моделей

Радиальные процессы переноса в элементарных геосистемах: <i>биогенные</i> (продуктивность, сукцессии, малый биокруговорот ); <i>атмогенные</i> (радиационный, конвективно-диффузионный и др) <i>гидроциркуляционные</i> (транспирация, трансформация осадков растительностью, влагомассоперенос в почвах, и др.)	Процессы латерального переноса на водосборах, барьеры и др.
---	---

# 1. Структурообразующие процессы в геосистемах низкого иерархического уровня

Тип процесса <i>Характерное время</i> шаг моделирования	Биоциркуляционные процессы переноса вещества и энергии	Геоциркуляционные процессы, почвенные процессы	Латеральные процессы сопряжения ландшафтов
<u>Час - несколько часов</u> Минуты	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Фотосинтез и дыхание отдельных органов</li> <li>2. Поглощение, мембранный и др. транспорт и перераспределение элементов минерального питания и ассимилятов внутри органов</li> <li>3. Поглощение влаги и регулирование транспирации устьичными механизмами</li> <li>4. Трансформация параметров микроклимата (радиация, ветер, температура, влажность, и т.п.) и газового состава атмосферы внутри и под пологом растений</li> <li>5. Процессы метаболизма отдельных особей и некоторых популяций редуцентов</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Инсоляция и процессы перераспределения и поглощения радиации</li> <li>2. Процессы газообмена в приземном слое атмосферы</li> <li>3. Процессы выпадения и перераспределения твердых и жидких атмосферных осадков</li> <li>4. Метаморфизация атмосферных выпадений биогоризонтами (ярусами растительности)</li> <li>5. Вертикальный гравитационный тепло-влаги-перенос и миграция растворенных веществ в почвах</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Динамика поверхностного склонового стока (водный, ионный, твердый сток) за единичный процесс</li> <li>2. Формы нахождения химических веществ в водах стока</li> <li>3. Биогенные процессы сопряжения: миграция организмов и биологически активных соединений</li> </ol>
<u>Сутки -несколько суток</u> Десятки минут, час	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Продукционные процессы и накопление биомассы растением в целом</li> <li>2. Активные и пассивные процессы обмена растений с почвой и атмосферой органическими и минеральными соединениями</li> <li>3. Трансформация суточного хода параметров микроклимата, влияние на мезо климатические процессы (широховатость поверхности, поле ветра, осадков и т.п., альbedo поверхности, температура, давление масс воздуха и т.п.)</li> <li>4. Динамика популяций редуцентов</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Выпадение сухих аэрозолей</li> <li>2. Формирование температурного поля и его суточной динамики в почвах</li> <li>3. Испарение, транспирация и капиллярное сорбционное перераспределение влаги по профилю почвы</li> <li>4. Динамика рН, Eh, рХ в верхних горизонтах почв под влиянием метаболизма</li> <li>5. Сорбция-десорбция, диффузионные, коагуляционные и др. процессы перераспределения минеральных и органических соединений между фазами и по профилю почвы</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Поверхностный дождевой сток на водосборах первых порядков (водный, ионный, твердый сток)</li> <li>2. Внутрипочвенный водный и ионный сток</li> <li>3. Динамика влажности и влагозапасов поверхностных горизонтов почв</li> <li>4. Динамика катастрофических процессов: пожары, ветровалы, наводнения и т.п.</li> </ol>
<u>Сезон - год</u> Сутки, декада	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Фенологические фазы</li> <li>2. Формирование продукции вертикальных ярусов (биогоризонтов)</li> <li>3. Перенос вещества и энергии по трофическим цепям</li> <li>4. Динамика опада и накопления мертвого органического вещества</li> <li>5. Формирование специфической сезонной динамики микроклимата</li> <li>6. Динамика гетеротрофных процессов минерализации органических веществ, накопление подстилки, торфа, высвобождение элементов зольного состава и т.д.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Сезонная динамика температуры почв, промерзание – оттаивание почв</li> <li>2. Динамика запасов влаги и воднорастворимых соединений в почве и снежном покрове</li> <li>3. Динамика рН – Eh условий почвенной среды и формирование распределения по профилю</li> <li>4. Почвенно-ферментативные процессы</li> <li>5. Динамика содержания элементов питания в почве</li> <li>6. Динамика состава поглощенных ионов в ППК</li> <li>7. Реологические и термореологические процессы и структурообразование в почвах</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Динамика сезонного стока на водосборах любого порядка</li> <li>2. Динамика грунтового стока и уровня грунтовых вод</li> <li>3. Балансы питательных веществ и агрохимикатов на склонах и водосборах</li> <li>4. Водно-солевые балансы по элементам рельефа</li> <li>5. Гравитационные (механические) склоновые процессы</li> </ol>
<u>Годы – десятилетие</u> Месяц, сезон	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Формирование продукции фитоценоза</li> <li>2. Динамика свойств органогенных горизонтов почв</li> <li>3. Биогеохимический круговорот углерода и зольных элементов</li> <li>4. Эндо- и экзогенная динамика микросукцессий</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Стадийное преобразование почвенных минералов и коллоидов (выветривание легко разрушающихся минералов, протонация, гидратация, кристаллизация, матричная достройка глинистых минералов и т.п.</li> <li>2. Матричная достройка гумуса почв</li> <li>3. Формирование микроморфологии почв</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Линейная, площадная эрозия и химическая денудация склонов</li> <li>2. Уровенный режим рек и водоемов стока водосборов высокого порядка</li> <li>3. Пионерное заселение извне, распространение растений</li> </ol>
<u>Десятилетия - века</u> Год, десятилетие	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Сукцессионные смены растительности</li> <li>2. Динамика формирования гумусовых, торфяных и других органогенных горизонтов почв</li> <li>3. Малый геохимический круговорот вещества</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Формирование мезоструктуры почвенных горизонтов (системы вертикальных трещин и сквозных пор)</li> <li>2. Формирование вертикальных почвенных морфонов</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Формирование микро- мезо- рельефа</li> <li>2. Формирование и динамика деятельного слоя</li> <li>3. Уровенный режим морей<sup>1</sup> и океанов</li> </ol>
Ближнее эволюционное <u>(геологическое)</u> Столетия, тысячелетие	Формирование структуры растительного покрова	Формирование структуры почвенного покрова	Формирование макро- и мегарельефа, глобальные геохимические и литогенные циклы, глобальные циклы похолодания – потепления и уровенный режим Мирового океана

# Систематизация структурообразующих процессов.

Обобщенный поток  $J_i$  в термодинамике необратимых процессов =>

$$J = -L \text{grad} U \cong \text{линейное уравнение Онзагера}$$

$$J_1 = L_{1,1}X_1 + L_{1,2}X_2 + \dots + L_{1,k}X_k = \sum_k L_{1,k}X_k$$

$$J_2 = L_{2,1}X_1 + L_{2,2}X_2 + \dots + L_{2,k}X_k = \sum_k L_{2,k}X_k$$

.....

$$J_i = L_{i,1}X_1 + L_{i,2}X_2 + \dots + L_{i,k}X_k = \sum_k L_{i,k}X_k$$

$$J_i = \sum_k L_{ik}X_k$$

Т. о. **природные** объекты и процессы могут дифференцироваться по

- 1) определяющим **потокам  $J_i$** ,
- 2) движущим силам  $X_k$  - **градиентам потенциалов силовых полей  $U$** ,
- 3) по **обобщенной проводимости  $L_{ik}$** , либо по всем одновременно.

Для описания потоков, сил и проводимостей **необходимо использовать** применяющиеся в географии **численные параметры:**

- **цифровых моделей рельефа (ЦМР)**
- **цифровых данных дистанционного зондирования (ДДЗ)**
- **измеряемые параметры** в ландшафтных, лесотаксационных, гидрологических, гидрогеологических, геофизических и др. исследованиях

**ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ЭТО ВВЕДЕНИЕ АКСИОМАТИКИ**

# Основные геосистемные аксиомы и постулаты

1. Геометрия пространства геосистем низких рангов с высокой степенью точности является евклидовой.
2. Принцип инерции Галилея выполняется во всех геосистемах. Инерциальность геосистем обеспечивает инвариантность физических законов относительного перехода из одной системы в другую.
3. Все геосистемы состоят из макроскопических тел, состоящих из очень большого количества атомов (молекул), имеют размеры более  $10^{-8}$  -  $10^{-7}$  м, и подчиняются классическим законам нерелятивистской механики.
4. Модельным представлением описания структуры объектов и тел является материальная точка (частица) и абсолютно твердое тело.
5. Состояние любой физической системы определяется набором независимых друг от друга величин и функций состояния.
6. Все фундаментальные силы в геосистемах имеют гравитационную и электромагнитную природу.
7. Потенциальное поле и градиент потенциала – движущая сила потоков и в целом развития систем.
8. Материальные точки геосистем находятся под воздействием одновременно большого числа независимых физических полей, их динамика реализуется в многомерном поле сил. Это в явном виде описывается уравнением неравновесной термодинамики Онзагера.
9. Математические модели и, в частности, уравнения математической физики в силу своей общности – основа развития теоретической базы ландшафтоведения, и развития натуральных наблюдений и экспериментов.
0. Источником гипотез являются эмпирические обобщения физической географии

## СИСТЕМАТИЗАЦИЯ УРОВНЕЙ ПОЧВЕННЫХ СТРУКТУР ПО МАСШТАБНОЙ ШКАЛЕ [Шеин, 2005]

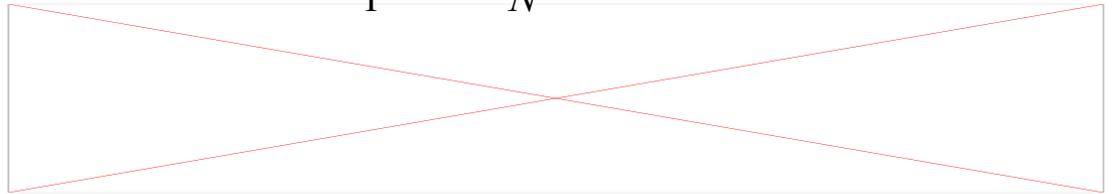
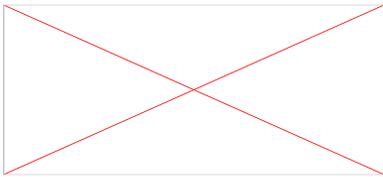
Масштабы рассмотрения	Обозначения
Глобальный	$i + 6$
Континентальный	$i + 5$
Региональный	$i + 4$
Водосборный (ландшафтный)	$i + 3$
Катенный	$i + 2$
Почвенного покрова (полипедон)	$i + 1$
Почвенный (педон)	$i$
Почвенного горизонта	$i - 1$
Почвенной структуры	$i - 2$
Текстурный	$i - 3$
Молекулярный и ионный	$i - 4$

# Параметры и функции состояния материальных систем

$x, y, z$  – координаты,  $v_x, v_y, v_z$  – компоненты скорости материальной точки (тела) в заданный момент времени  $t$

$$v(x, t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{dx}{dt}$$

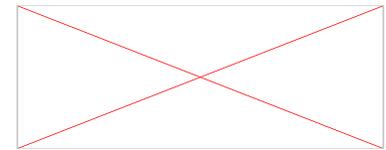
Опытным путем установлено, что для изолированных систем, состоящих из  $N$  материальных точек, скорости которых  $v_1, \dots, v_N$ , частицы характеризуются некоторыми определенными константами  $m_1, \dots, m_N$ , такими, что



$m_i$  – масса является мерой инерции частицы,  $m_0$  – масса эталона.

В последнем выражении мы задаем важную **процедуру измерения параметров состояния**

$$\rho = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta x} = \frac{dm}{dx}, \quad m_{a,b} = \int_a^b \rho(x, t) dx.$$



$\rho(x, t)$  – линейная плотность среды,  $m_{a,b}$  – масса на участке  $a-b$ ,  $V$  – объем

$$q = q(x, t) = \rho v = \frac{dm}{dx} v$$

$q(x, t)$  – потоком массы, локальный параметр среды



## Силловые поля и взаимодействия

Производная импульса частицы во времени есть **сила F**, действующей на частицу со стороны ее окружения

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = \mathbf{F} \rightarrow \frac{d\mathbf{p}}{dt} = \frac{d(m\mathbf{v})}{dt} = m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = m\mathbf{a} = \mathbf{F}$$

Фундаментальные взаимодействия: гравитационные, электромагнитные, слабые и сильные (ядерные)

Принцип гравитационного дальнего действия

$G$  – гравитационная постоянная ( $6,672 \cdot 10^{-11}$  м<sup>3</sup>/кг·с),

$$F_{12} = G \frac{m_1 m_2}{r^2} ;$$

экспериментально *гравитационные массы* совпадают с *инерционными массами* с точностью до  $10^{-11}$  – их тождество постулат ОТО

Для электромагнитных взаимодействий Фарадей ввел представление о поле, которое оказывает силовое воздействие на заряд. Изменения энергии (импульса) заряженной частицы передаются окружающему электромагнитному полю, которое само по себе обладает энергией и импульсом, и может существовать самостоятельно (например, световые волны, радиоволны и др.)

## СПЛОШНАЯ СРЕДА

Исследование материальных тел - построение макроскопической теории, основанной на общих закономерностях и гипотезах, полученных опытным путем.

**Первая гипотеза** - переход от системы точек к сплошной среде. Все тела состоят из отдельных частиц, которых очень много в любом существенном для геосистем объеме. Поэтому каждое тело рассматривается как среда, сплошным образом заполняющая предоставленную часть пространства. Такая идеализация позволяет использовать аппарат дифференциального и интегрального исчисления.

**Вторая гипотеза** определяет пространство, в котором рассматривается материальное тело, как совокупность точек, задаваемых числами – координатами точек. Все объекты будем изучать в евклидовом пространстве, в котором вводится единая для всех точек декартова прямоугольная система координат  $(x_1, x_2, x_3, \text{ или } x, y, z)$ , и между любыми двумя точками А и В определено расстояние – евклидова метрика – по формуле:

$$r = \sqrt{(x_1^A - x_1^B)^2 + (x_2^A - x_2^B)^2 + (x_3^A - x_3^B)^2}$$

**Третья гипотеза** - используется абсолютное время. Т.е. мы не будем учитывать эффекты теории относительности. Будем изучать поведение сплошной среды – континуума в евклидовом пространстве с использованием абсолютного времени и будем базироваться на законах термодинамики необратимых процессов и механики сплошной среды.

## Потенциальное силовое поле и градиент потенциала

Работа равна произведению силы на расстояние, пройденное телом под воздействием этой силы. Элементарная работа  $dA$  сил, действующих на материальную точку системы:

$$dA = F_x dx + F_y dy + F_z dz$$

Поле сил называется потенциальным, если существует такая **скалярная функция координат точки  $U(x, y, z)$** , что частные производные от этой функции по  $x, y, z$  равны проекциям  $F_x, F_y, F_z$  вектора силы  $\vec{F}$  на эти оси:

$$F_x = -\frac{\partial U}{\partial x}, \quad F_y = -\frac{\partial U}{\partial y}, \quad F_z = -\frac{\partial U}{\partial z}, \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1) получим:

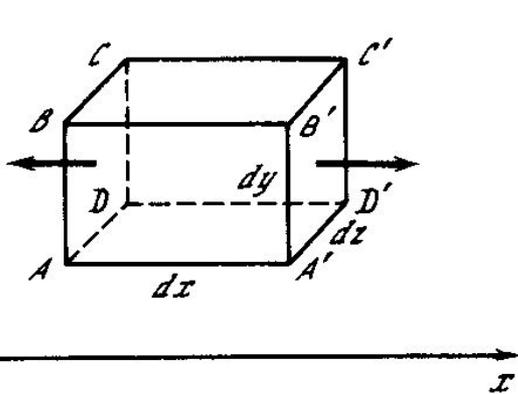
$$dA = -\frac{dU}{dx} dx - \frac{dU}{dy} dy - \frac{dU}{dz} dz = dU \quad (3)$$

Элементарная работа равна полному дифференциалу функции  $dU$ , называемой **потенциальной энергией**, которая зависит только от положения частицы и не зависит от пути, пройденного частицей. Вектор с компонентами  $(\partial U/\partial x, \partial U/\partial y, \partial U/\partial z)$  называется **градиентом** функции  $U$ :

$$\vec{F} = -\left( \frac{\partial U}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial U}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial U}{\partial z} \vec{k} \right) = -\text{grad}U = -\nabla U \quad (4)$$

# Поток величины, дивергенция вектора

Рассмотрим поток  $J$  вектора  $\mathbf{A}$  в трехмерном пространстве



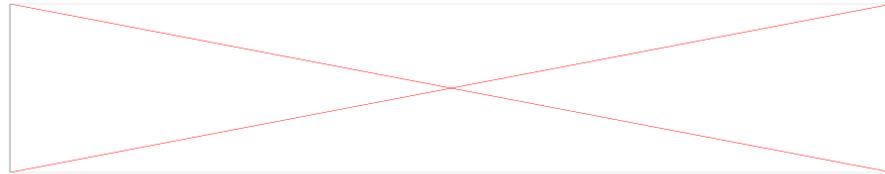
$$ds_{ABCD} = dzdy$$

$$dJ_{ABCD} = -A_x(x) dydz$$

$$ds_{A'B'C'D'} = dydz$$

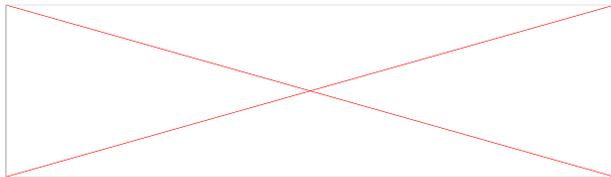
$$dJ_{A'B'C'D'} = A_x(x+dx) dydz$$

$$dJ_{ABCD} + dJ_{A'B'C'D'} = [A_x(x+dx) - A_x(x)] dydz$$



Приращение потока по оси  $x$ :

$$dJ = \left( \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z} \right) dx dy dz$$

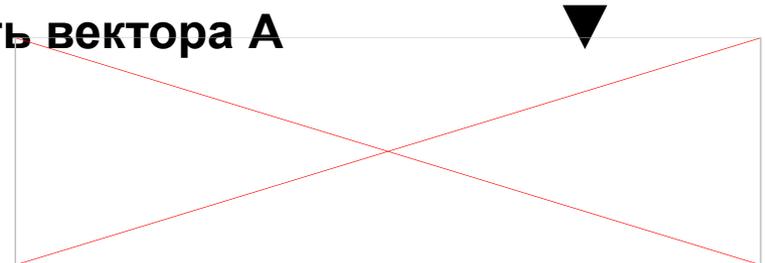


$$J = \int_S \mathbf{A} ds = \int_V \left( \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z} \right) dV$$

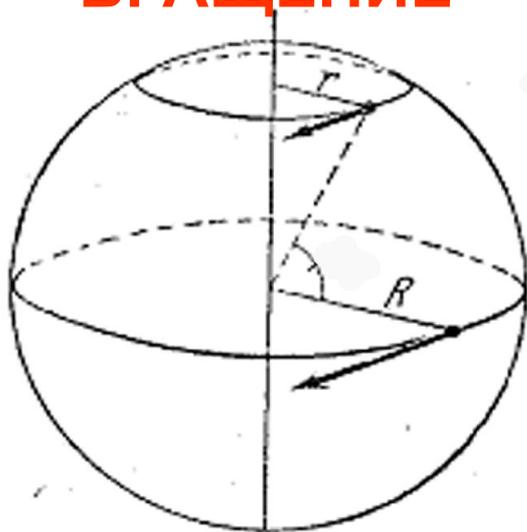
$\text{div} \mathbf{A}$  - скаляр дивергенция, или расходимость вектора  $\mathbf{A}$

$$(\nabla \mathbf{A}) = \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z} = \text{div} \mathbf{A}$$

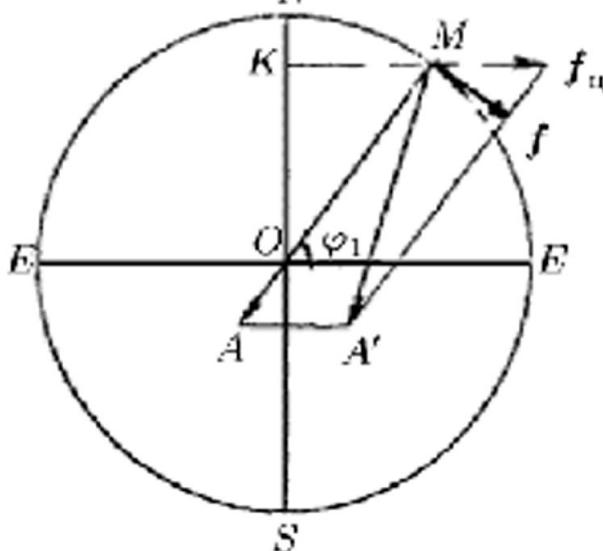
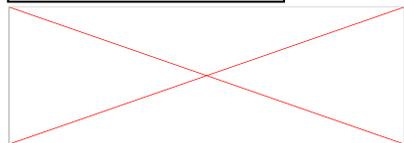
(5)



# ВРАЩЕНИЕ ФОРМА ЗЕМЛИ И СИЛА ТЯГОТЕНИЯ



$$F = G \frac{mM}{r^2}$$



Уменьшение силы тяжести вследствие вращения Земли.

$$g = F - f_u; \quad f_u = \omega^2 R \cos \phi$$

$$g = G \frac{M}{r^2} - \omega^2 l \quad (6)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{86164,09890} = 7,29211 \cdot 10^{-5} \text{ рад/сек}$$

$$\frac{\text{м}^3}{\text{кг} \cdot \text{с}^2} f_{\text{цэkv}} = 3,39158 \text{ гал (см/с}^2), \quad f_{\text{цпол}} = 0$$

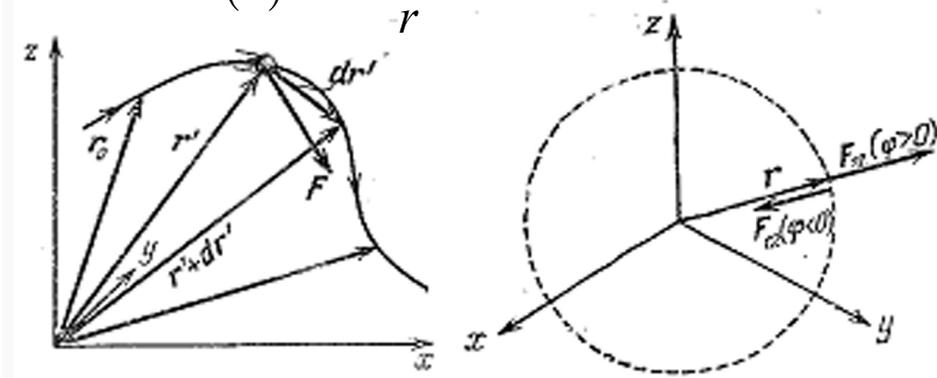
Геодинамическая постоянная  $q$  – отношение центробежной силы к силе тяготения:

$$q = \frac{\omega^2 a}{GM/a^2} = \frac{\omega^2 a^3}{GM} = 34614,072 \times 10^{-7} = \frac{1}{288} \approx 0,5\%$$

нормальная удельная сила тяжести в зависимости от широты:

$$\gamma = 978,0318 (1 + 0,0053024 \sin^2 \phi - 0,0000059 \sin^2 2\phi)$$

**Гравитационный потенциал частицы в поле гравитации**  $U(r)$ , обращаящийся в нуль при бесконечном удалении частицы массы  $m$  от силового центра массой  $M$ , равен  $U(r) = \frac{-GmM}{r}$  и соответственно (4) сила притяжения  $-\text{grad}U = \frac{GmM}{r^2} \cdot \left(\frac{\nabla r}{r}\right)$



Вектор напряженности гравитационного поля в точке с радиус-вектором  $\mathbf{r}$  равен силе, которая действует на материальную точку с массой, равной единице

$$\mathbf{F} = -G \frac{m \cdot \mathbf{r}}{r^3} \quad (7) \quad |F| = Gm / r^2$$

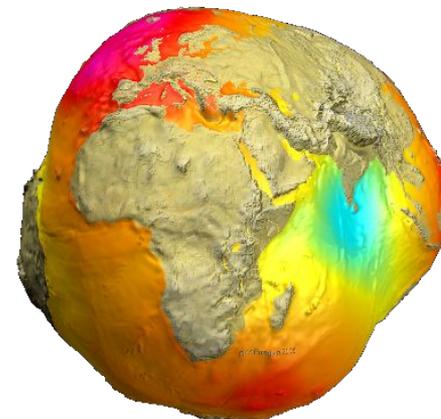
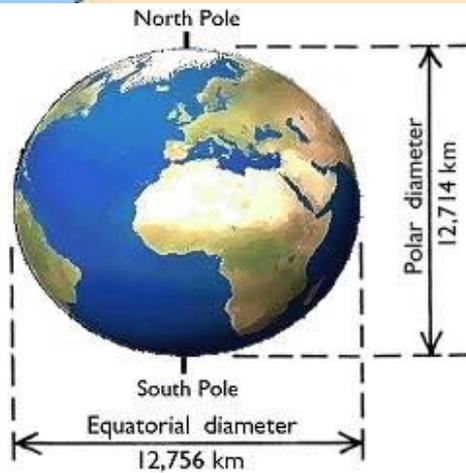
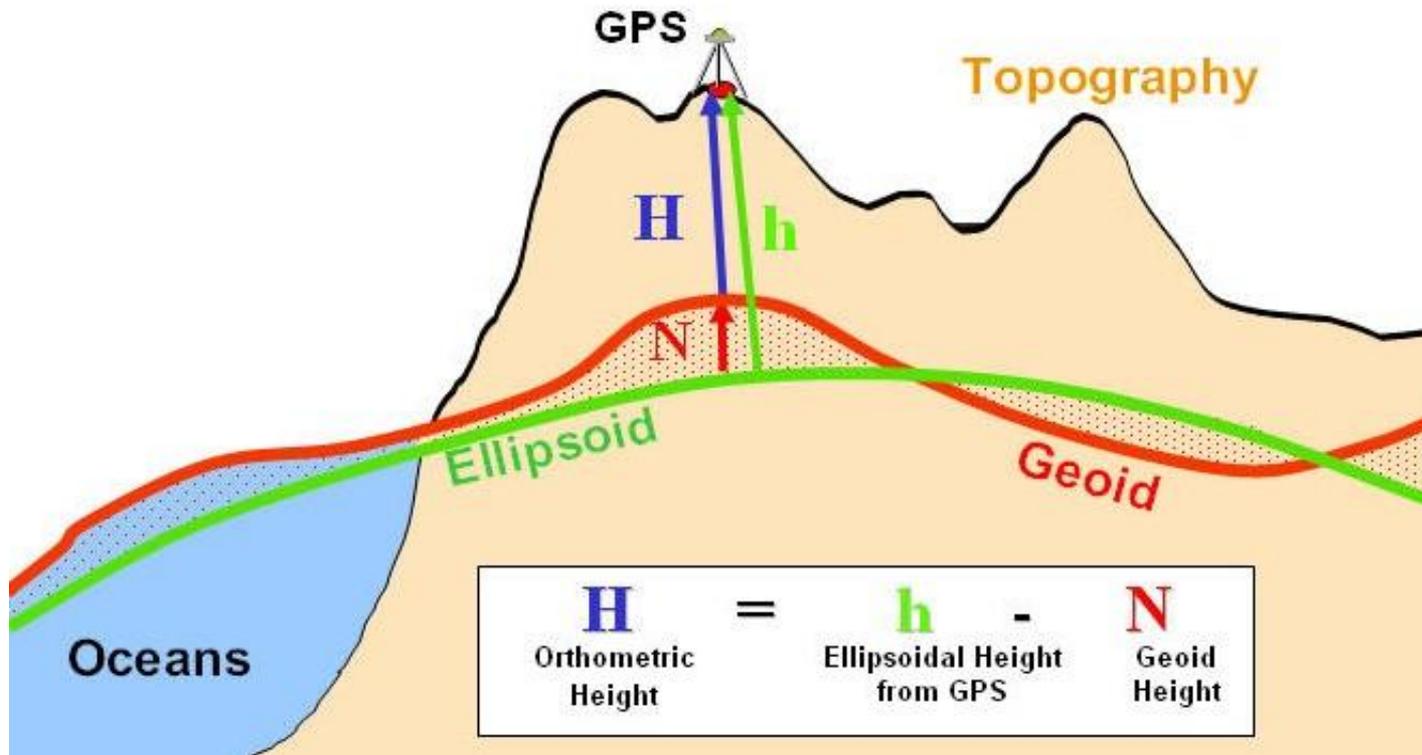
В геофизике декартова система координат задается традиционно: ось  $Oz$  совпадает с осью вращения планеты, две другие оси лежат в экваториальной плоскости, т.е. компоненты вектор силы (2) равны  $F_x = -Gmx/r^3$ ,  $F_y = -Gmy/r^3$ ,  $F_z = -Gmz/r^3$

**Гравитационный потенциал Земли.** По принципу суперпозиции гравитационный потенциал  $n$  точек равен сумме гравитационных потенциалов всех точек, т.е. для тела  $V$  можно записать  $V = G \left( \frac{m_1}{r_1} + \frac{m_2}{r_2} + \dots + \frac{m_n}{r_n} \right) = G \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{r_i} \Rightarrow V(r) = G \iiint_T \frac{dm}{r} \quad (8)$

Приближенное решение (3) получено для Земли с помощью разложения в ряд полиномами Лежандра:

$$W(x, y, z) = \frac{GM}{r} - \frac{GMR_3^2}{r^3} J_2 \left( \frac{2}{3} \sin^2 \varphi - \frac{1}{2} \right) + \frac{1}{2} \omega^2 r^2 \sin^2 \varphi. \quad \boxed{g = -\frac{dW}{dn}} \quad (9)$$

# ГЕОИД И ЭЛЛИПСОИД



# ГЕОСТАЦИОНАРНЫЕ МОДЕЛИ ГЕОСИСТЕМ

## 2. Формализация пространственной структуры геосистем

Классическая эмпирическая теория ландшафта, теории физической географии

*Элементарный ПТК  
Структура ландшафта*

Геосистемные аксиомы и связующие постулаты

*Элементарные материальные точки*

*Параметры и функции состояния ПТК*

*Физические законы разной степени фундаментальности*

Измеряемые геофизические параметры состояния ландшафтов -

*Априорные данные*

*Апостериорные данные*

*Морфометрические параметры по цифровым моделям рельефа (ЦМР)*

*Цифровые данные дистанционного зондирования (ДДЗ)*

*Инструментально измеряемые в природе, в лабораторных условиях, и т.п.*

# Описание пространственной структуры геосистем

## 1. ТИПОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД ВЫДЕЛЕНИЯ ПТК :

**Элементарный ПТК** - приурочен к одному *элементу мезорельефа*; это территория *однородная по* трем своим характеристикам: литологическому (петрографическому) составу пород, *углам наклона рельефа и экспозиции склона*. В этом случае суммарная *солнечная радиация* и атмосферные осадки, поступающие на поверхность, одинаковы. Поэтому формируются один микроклимат и один водный режим, один биогеоценоз, одна почвенная разность и однообразный комплекс почвенной мезофауны [Дьяконов, 2004].

**Следовательно:**

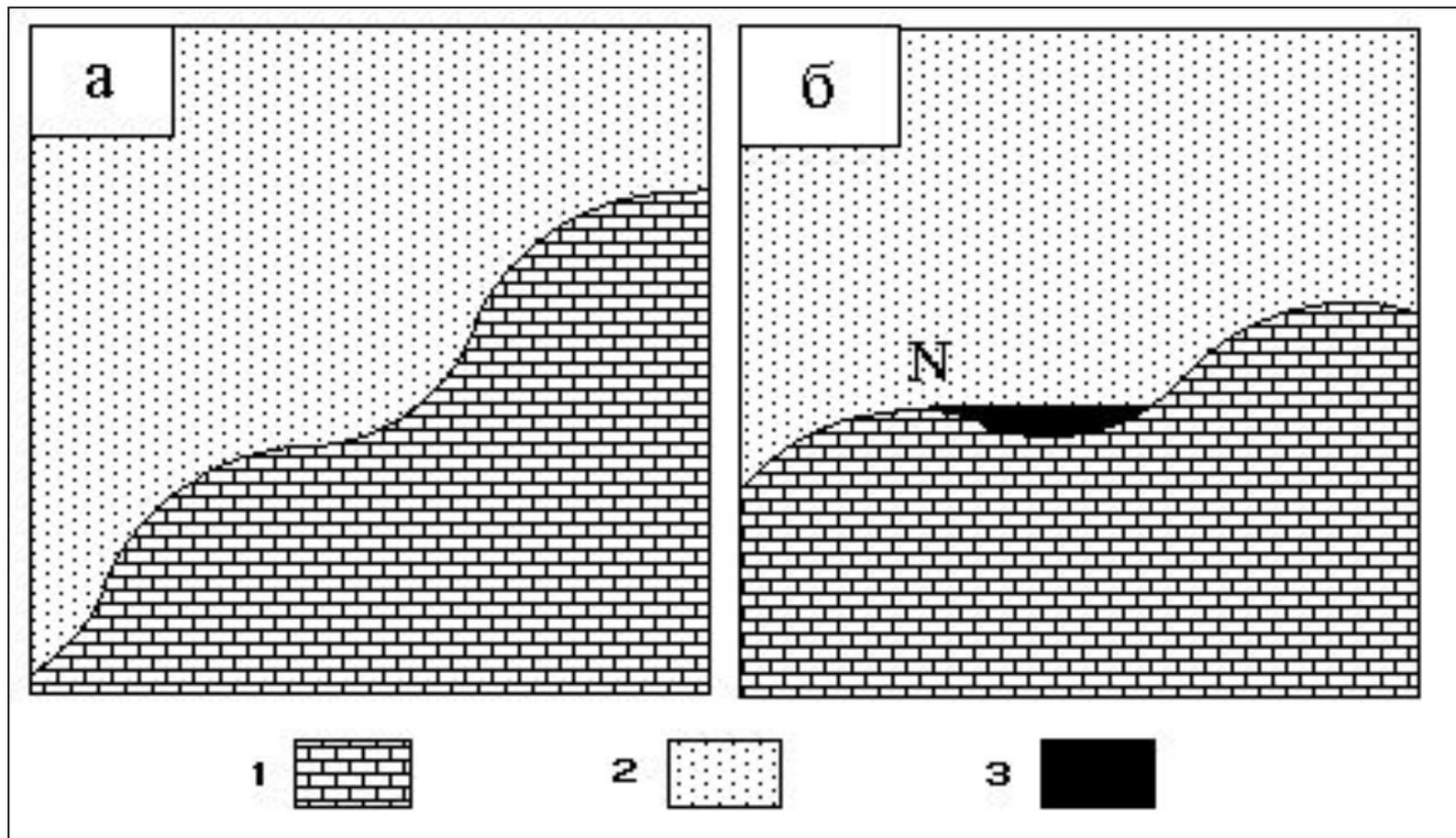
потенциальная **дифференциация ПТК** может быть **определена на множестве элементов поверхности рельефа** отображением морфометрических **параметров** описания **градиентов полей инсоляции и гравитации**.

**Уравнения теории поля и дифференциальной геометрии являются как минимум достаточным условием для геофизического описания потенциальной дифференциации природных территориальных комплексов.**

## 2. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ ГЕОСИСТЕМ

**Классы морфометрических величин и понятий [Шарый, 1995].**

<b>Морфометрические величины и связанные с ними понятия</b>	<b>Локальные</b>	<b>Глобальные</b>
Не инвариантные по отношению к наклону поверхности (к индуцирующим векторным полям - гравитационному, инсоляционному и др.)	Класс <i>A</i>	Класс <i>B</i>
Инвариантные по отношению к выбору системы координат	Класс <i>C</i>	Класс <i>D</i>



К понятиям *V*- и *D*-депрессий: две одинаковые по форме, но различно ориентированные в гравитационном поле поверхности, слева показана *D*-депрессия (углубление в земной поверхности), справа – *V*-депрессия (часть углубления, способная удерживать воду).

1 - грунт; 2 - воздух; 3 - вода.

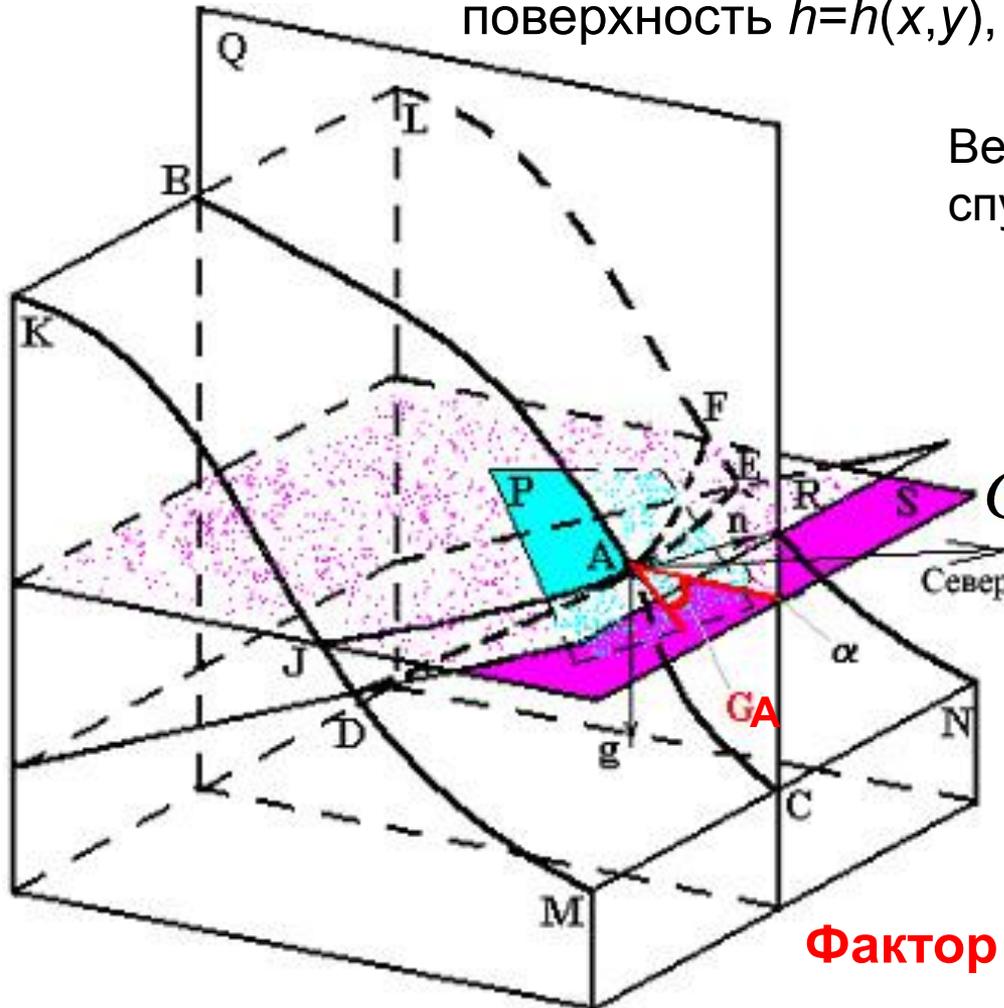
## Формулы расчета локальных морфометрических величин [Shary, 1995].

( $p=\partial z/\partial x$ ;  $q=\partial z/\partial y$ ;  $r=\partial^2 z/\partial x^2$ ;  $s=\partial^2 z/\partial x\partial y$ ;  $t=\partial^2 z/\partial y^2$ ,  $z=z(x,y)$ ).

Название величины, класс	Размерность	Формула	Ссылка
Крутизна склонов, класс A	градусы	$GA=\arctg(p^2+q^2)^{1/2}$	---
Фактор крутизны, класс A	безразм	$GF=(p^2+q^2)^{1/2}/[1+p^2+q^2]^{1/2}$	---
Ориентация склонов, класс A	градусы	$A_0=-90[1-\text{sign}(q)](1- \text{sign}(p) )+180[1+\text{sign}(p)]-180\text{sign}(p)\arccos[-q/(p^2+q^2)^{1/2}]/\pi$	---
Средняя кривизна, класс C	1/м	$H=-[(1+q^2)r-2pqs+(1+p^2)t]/[2(1+p^2+q^2)^{3/2}]$	(Young, 1805)
Горизонтальная кривизна, класс A	1/м	$kh=-(q^2r-2pqs+p^2t)/[(p^2+q^2)(1+p^2+q^2)^{1/2}]$	(Krcho, 1983)
Плановая кривизна*, класс A	1/м	$kp=-(q^2r-2pqs+p^2t)/(p^2+q^2)^{3/2}$	(Evans, 1972)
Вертикальная кривизна, класс A	1/м	$kv=-(p^2r+2pqs+q^2t)/[(p^2+q^2)(1+p^2+q^2)^{3/2}]$	(Evans, 1972)
Минимальная кривизна, класс C	1/м	$kmin=H-M$	---
Максимальная кривизна, класс C	1/м	$kmax=H+M$	---
Полная гауссова кривизна, класс C	1/м <sup>2</sup>	$K=(rt-s^2)/(1+p^2+q^2)^2$	(Гайсс, 1827)
Освещенность склонов**, класс A	%	$F=50\{1+\text{sign}[\text{cosa}-\text{sina}*(p\text{sin}b+q\text{cos}b)]\}[\text{cosa}-\text{sina}*(p\text{sin}b+q\text{cos}b)]/(1+p^2+q^2)$	(Onorati et al., 1992)

## КРУТИЗНА СКЛОНОВ $G$ (slope steepness) –

абсолютная величина градиента поля тяготения (безразмерна).  
Земная поверхность - дважды непрерывно дифференцируемая  
поверхность  $h=h(x,y)$ ,  $p=\partial h/\partial x$ ,  $q=\partial h/\partial y$



Вектор, в направлении наиболее крутого  
спуска вниз по склону:

$$-\text{grad}(h) = -pi - qj$$

$i$  и  $j$  - орты осей  $x$  и  $y$

$$G = |\text{grad}(h)| = (p^2 + q^2)^{1/2} \quad (1)$$

**Угол уклона  $GA$**  (градусы):

$$GA = \text{arctg}(G)$$

**Фактор крутизны  $GF$**  (безразмерный):

$$GF = \sin(GA) = \sin[\text{arctg}(G)] = G/(1+G^2)^{1/2} \quad (2)$$

В точках поверхности  $h(x,y)$  определим вектор единичной длины  $-\text{grad}(h)/G$ ; обозначая через  $u$  направленный вдоль этого вектора элемент длины на карте (т.е. на плоскости  $z=0$ ), находим

$$dr/du = -\text{grad}(h)/G = -(p_i + q_j)/(p^2 + q^2)^{1/2}, \quad (4)$$

где  $r(x,y)$  - вектор определяющий положение точки на карте. **Линия, касательная к которой есть  $dr/du$** , называется **линией тока**; вдоль этих линий течет вода.

Дифференцируя уравнение горизонтали  $h(x,y)=\text{const}$  по длине горизонтали  $v$ , находим

$$pdx/dv + qdy/dv = 0.$$

Из курса математического анализа известно, что для плоской кривой

$$(dx/dv)^2 + (dy/dv)^2 = 1;$$

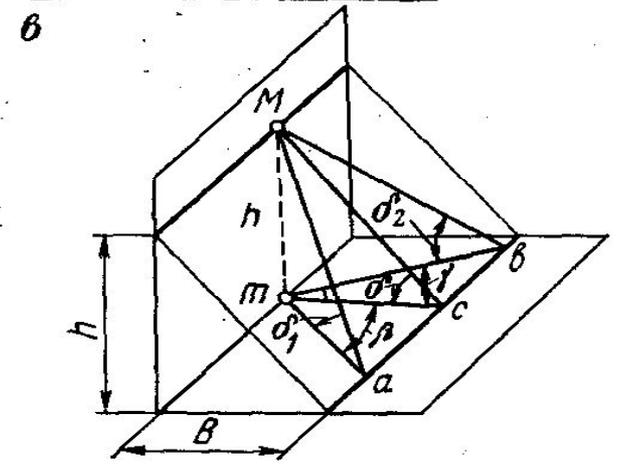
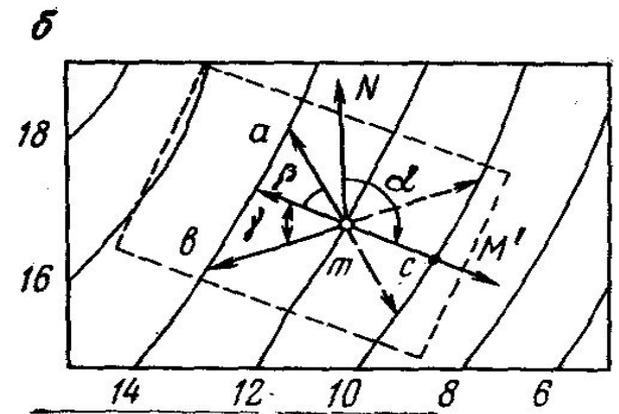
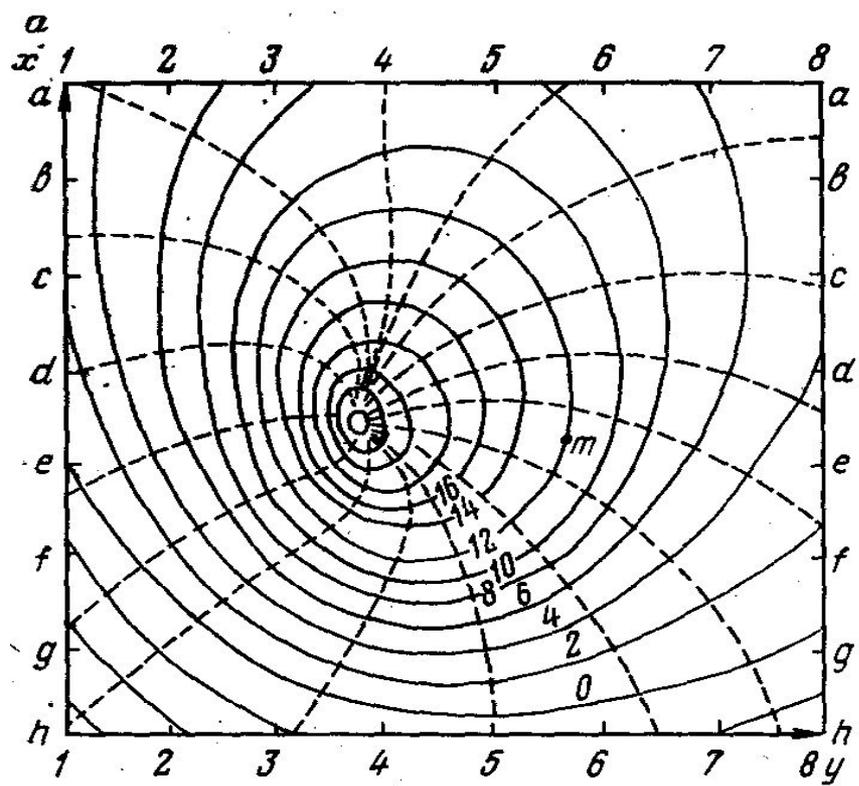
из последних двух равенств следует

$$dr/dv = \pm(-q_i + p_j)/(p^2 + q^2)^{1/2} \quad (5)$$

По формулам (4) и (5) проверяется, что скалярное произведение  $(dr/du, dr/dv)$  равно нулю. Этим доказано, что горизонталы и линии тока взаимно перпендикулярны; на карте они образуют криволинейную ортогональную сетку.

$$(p = \partial z / \partial x; q = \partial z / \partial y; r = \partial^2 z / \partial x^2; s = \partial^2 z / \partial x \partial y; t = \partial^2 z / \partial y^2, z = z(x, y)).$$

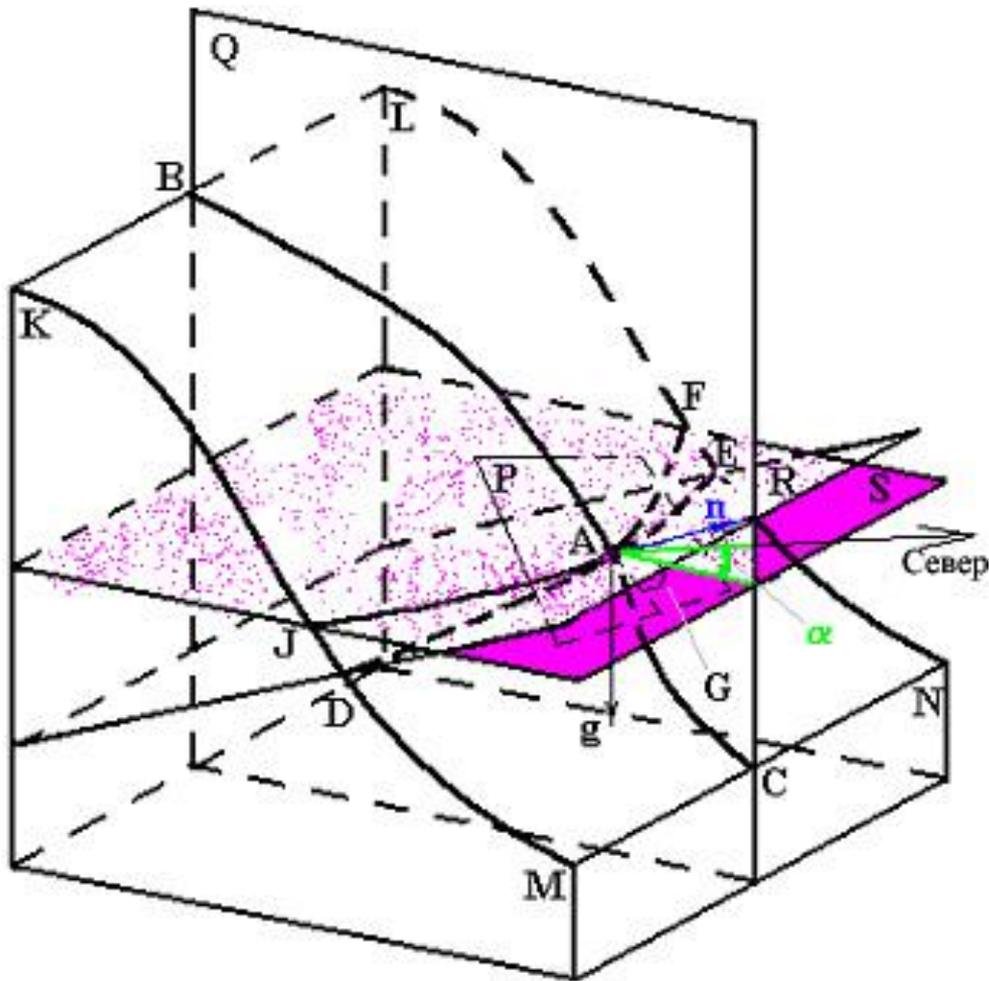
# Поле высот $z = z(x, y)$ и иллюстрация расчета вектора $\text{grad}z$



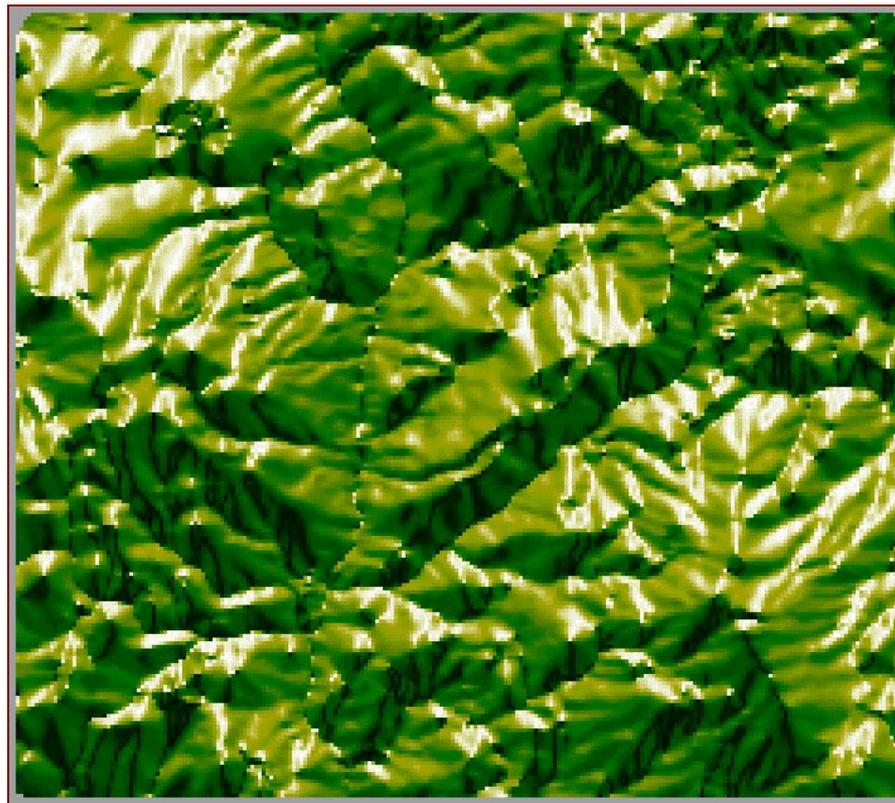
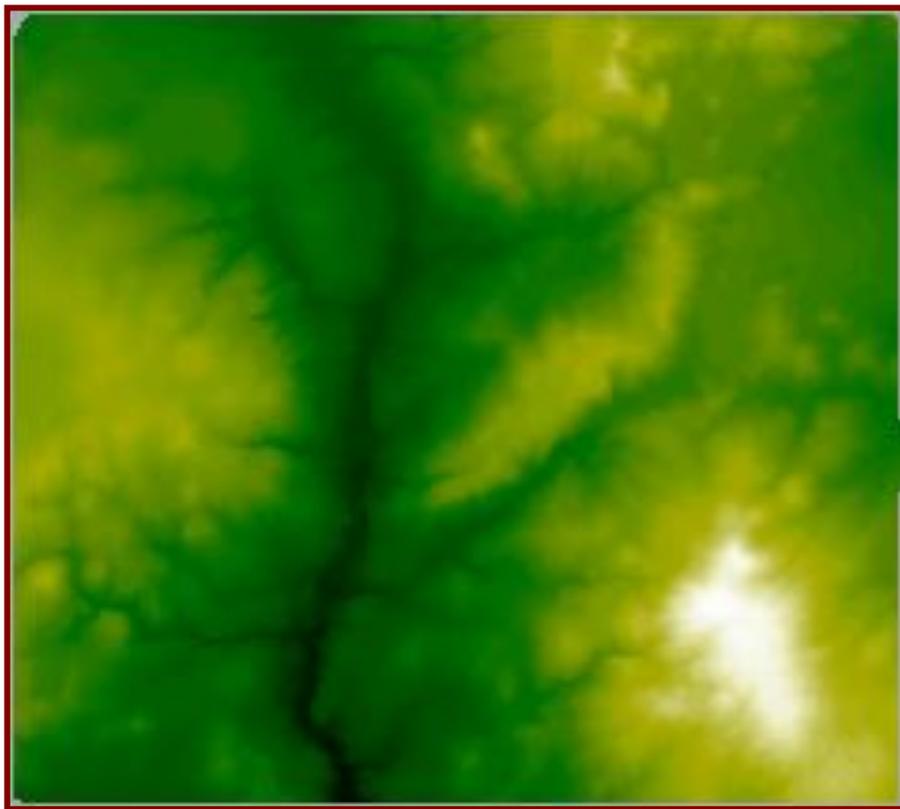
$h$  – сечение рельефа, разность отметок соседних горизонталей;  $B$  – заложение – кратчайшее расстояние между двумя соседними горизонталями.

$$|\text{grad}z| = \text{tg}\delta = h/B$$

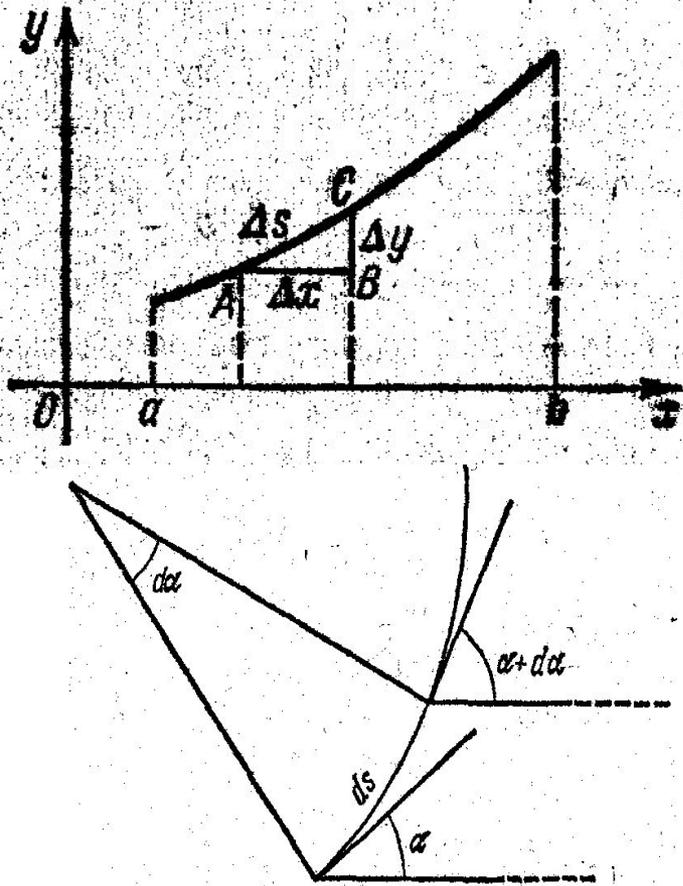
Ориентация склонов,  $\alpha$  (*aspect*) - азимут направления склона, отсчитываемый от северного направления по часовой стрелке



Цифровая модель рельефа (слева) и ориентации склонов (справа) южной части  
Центрального лесного государственного биосферного заповедника



# Геометрический и физический смысл кривизны плоской кривой $f(x,y)$



$$\Delta s = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} = (\Delta x) \sqrt{1 + \left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right)^2} \rightarrow \frac{\Delta s}{\Delta x} = \sqrt{1 + \left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right)^2}$$

Переходя к пределу при  $\Delta x \rightarrow 0$ ,  $\Delta y \rightarrow 0$  получаем

$$ds = \sqrt{1 + f'^2(x)} dx = \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx = \sqrt{dx^2 + dy^2}$$

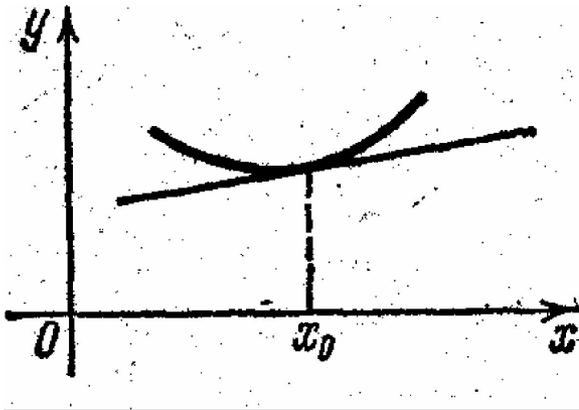
Рассмотрим участок кривой как дугу окружности

$$ds = R d\alpha \rightarrow \frac{d\alpha}{ds} = \frac{1}{R} \quad \text{поскольку } \alpha = \arctg y'$$

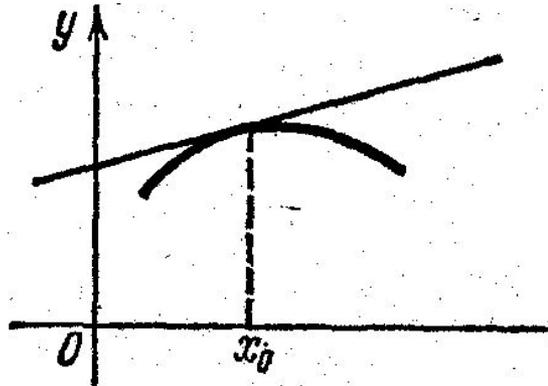
$$d\alpha = d \arctg \frac{dy}{dx} = \frac{\frac{dy}{dx}}{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx$$

Подставляя в формулу кривизны

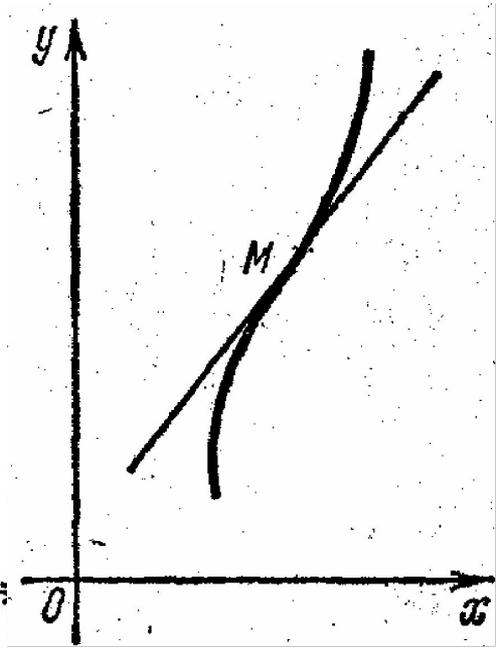
$$\frac{d\alpha}{ds} = \frac{1}{\left(1 + \frac{dy}{dx}\right)^{3/2}} \cdot \frac{dx}{dx} = \frac{\frac{d^2 y}{dx^2}}{\left(1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right)^{3/2}} = \frac{y''}{\left(1 + y'^2\right)^{3/2}} \quad (3)$$



$$y''(x_0) > 0$$

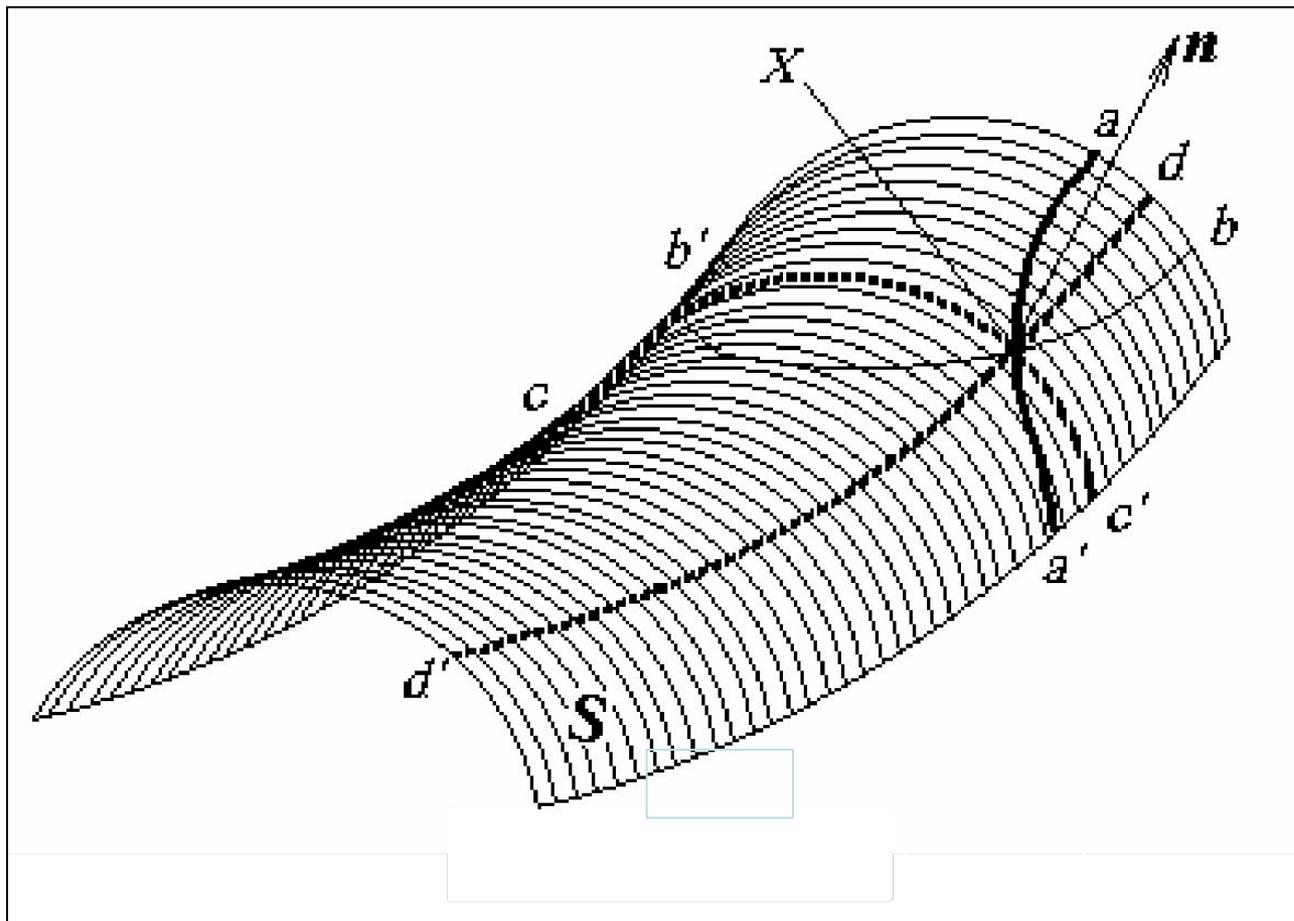


$$y''(x_0) < 0$$



$$y''(x_0) = 0$$

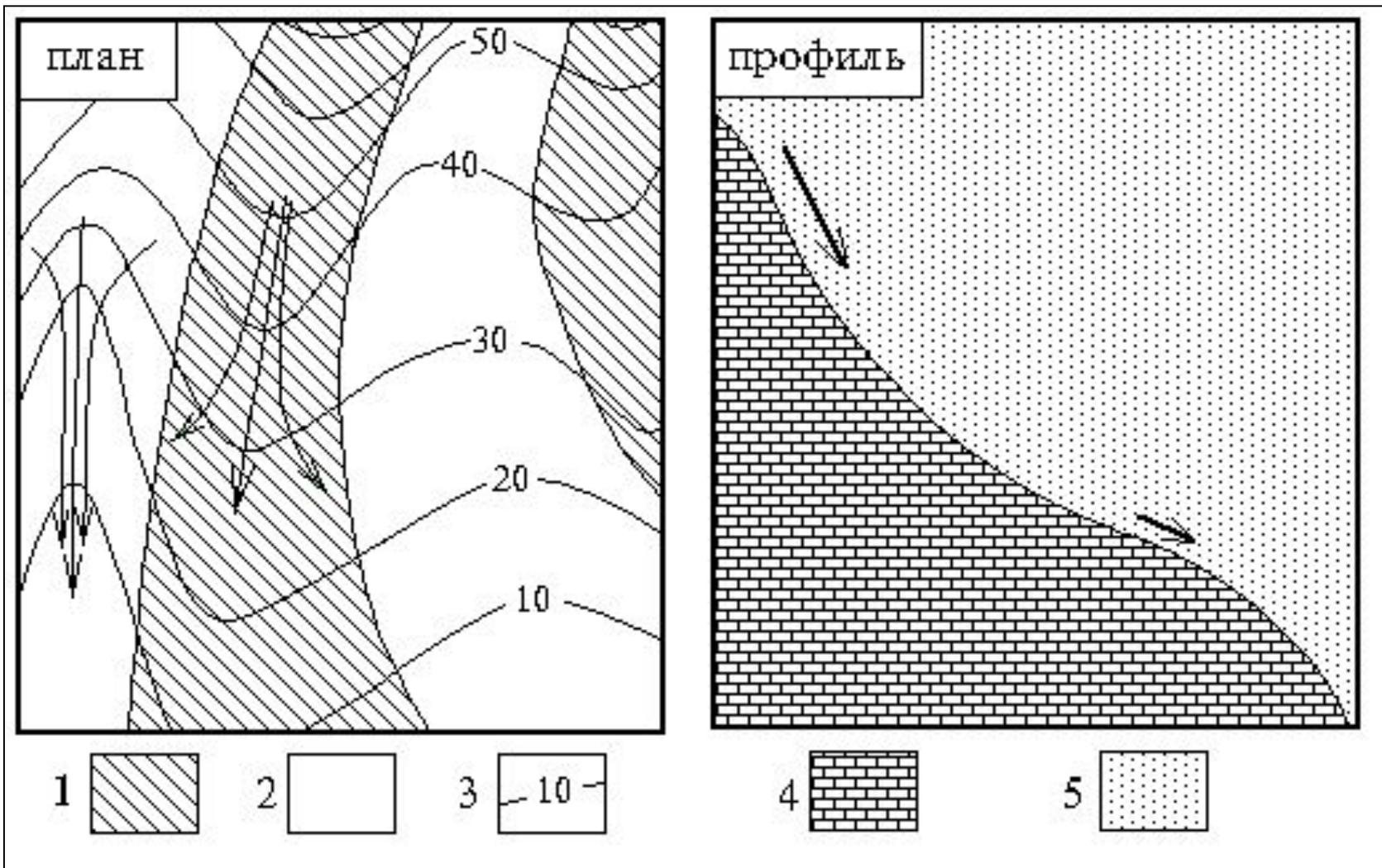
# Геометрический и физический смысл системы кривизн на основе понятие нормального сечения поверхности



# К ОПИСАНИЮ ДВУХ ОСНОВНЫХ МЕХАНИЗМОВ АККУМУЛЯЦИИ [ШАРЫЙ, 1991].

Слева – первый механизм аккумуляции, сближение потоков; второй механизм аккумуляции за счет относительного замедления потоков.

1 –зоны дивергенции, 2 –зоны конвергенции, 3 –горизонталы, 4 – грунт, 5 –воздух.



Теорема: **О первом механизме аккумуляции** (Shary, 1995)

Для неособых точек дважды непрерывно дифференцируемой поверхности **дивергенция единичного вектора  $dr/du$  линий тока равна плановой кривизне  $k_p$ .**

**Доказательство.**

$$\operatorname{div}(dr/du) = \partial(dx/du)/\partial x + \partial(dy/du)/\partial y$$

и согласно **(4)**,

$$dx/du = -p/(p^2+q^2)^{1/2}, \quad dy/du = -q/(p^2+q^2)^{1/2};$$

дифференцируя эти выражения по  $x$  и  $y$ , соответственно, находим

$$\operatorname{div}(dr/du) = -(q^2r - 2pqs + p^2t)/(p^2+q^2)^{3/2}.$$

Но правая часть этого равенства есть  $k_p$ , согласно **(7)**.

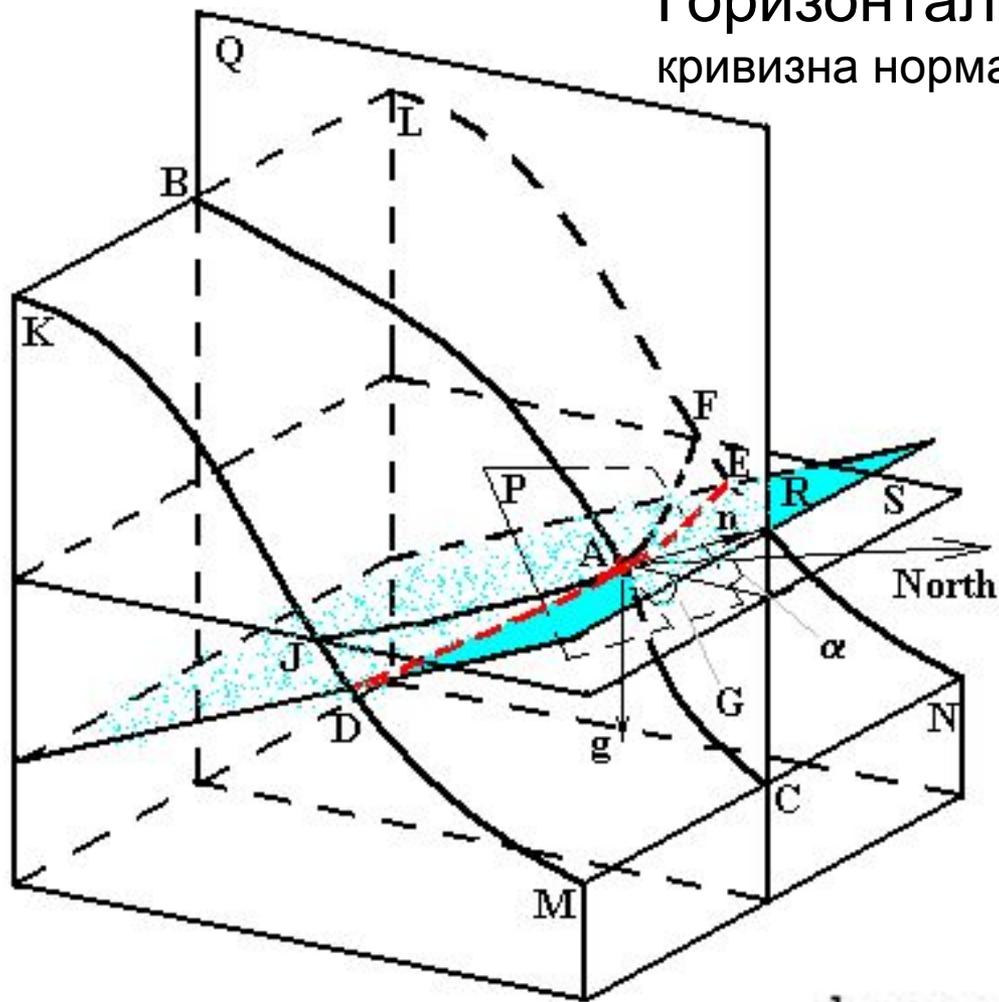
Т.о.,  $\operatorname{div}(dr/du) = k_p$ .

Теорема доказана

Первый механизм аккумуляции - сближение линий тока в участках местности, где  $k_p < 0$  (или  $k_h < 0$ ), и расхождение их в тех участках местности, где  $k_p > 0$  (или  $k_h > 0$ ).

$$(p = \partial z / \partial x; q = \partial z / \partial y; r = \partial^2 z / \partial x^2; s = \partial^2 z / \partial x \partial y; t = \partial^2 z / \partial y^2, z = z(x, y)).$$

Горизонтальная кривизна  $k_h$   
 кривизна нормального сечения с поверхностью DAE



$$k_h = - \frac{q^2 r - 2pqs + p^2 t}{(p^2 + q^2) \sqrt{1 + p^2 + q^2}} \quad (7)$$

**Теорема: О втором механизме аккумуляции.** Для неособых точек дважды непрерывно дифференцируемой поверхности производная фактора крутизны  $GF$  по длине линии тока  $u$  равна вертикальной кривизне  $k_v$ .

**Доказательство.** По формуле (2)  $GF = G/(1+G^2)^{1/2}$ , откуда производная  $dGF/du = [dG/du(1+G^2)^{1/2} - G^2(dG/du)(1+G^2)^{-1/2}]/(1+G^2) = (dG/du)/(1+G^2)^{3/2}$ , т.е.  $dGF/du = dG/du(1+G^2)^{-3/2}$ .

Поскольку  $G = (p^2 + q^2)^{1/2}$ ,

$$dG/du = (pdp/du + qdq/du)/(p^2 + q^2)^{1/2} =$$

$$\{p[(dp/dx)(dx/du) + (dp/dy)(dy/du)] + q[(dq/dx)(dx/du) + (dq/dy)(dy/du)]\}/(p^2 + q^2)^{1/2}$$

$$\text{или } dG/du = \{p[r(dx/du) + s(dy/du)] + q[s(dx/du) + t(dy/du)]\}/(p^2 + q^2)^{1/2} =$$

$$[(pr + qs)dx/du + (ps + qt)dy/du]/(p^2 + q^2)^{1/2}.$$

Подставляя сюда выражения для  $dx/du$  и  $dy/du$  из (2.2), находим для производной  $dG/du$ :

$$dG/du = -[(pr + qs)p + (ps + qt)q]/(p^2 + q^2) = -(p^2r + 2pqs + p^2t)/(p^2 + q^2).$$

Теперь из  $dGF/du = dG/du(1+G^2)^{-3/2}$  получаем

$$dGF/du = -(p^2r + 2pqs + p^2t)/[(p^2 + q^2)(1 + p^2 + q^2)^{3/2}],$$

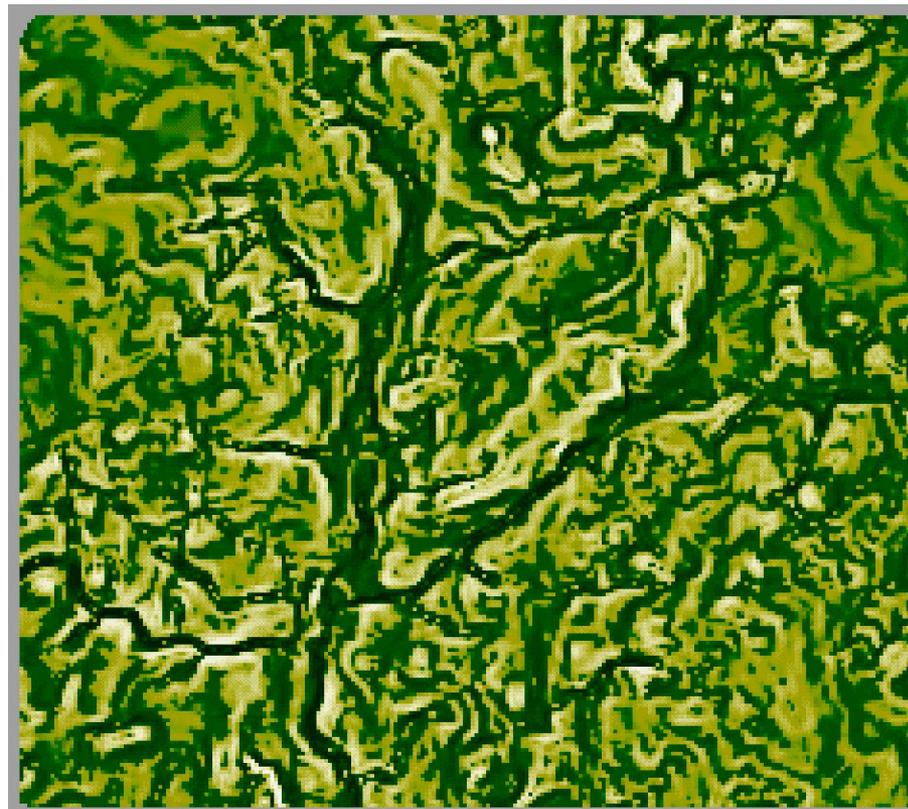
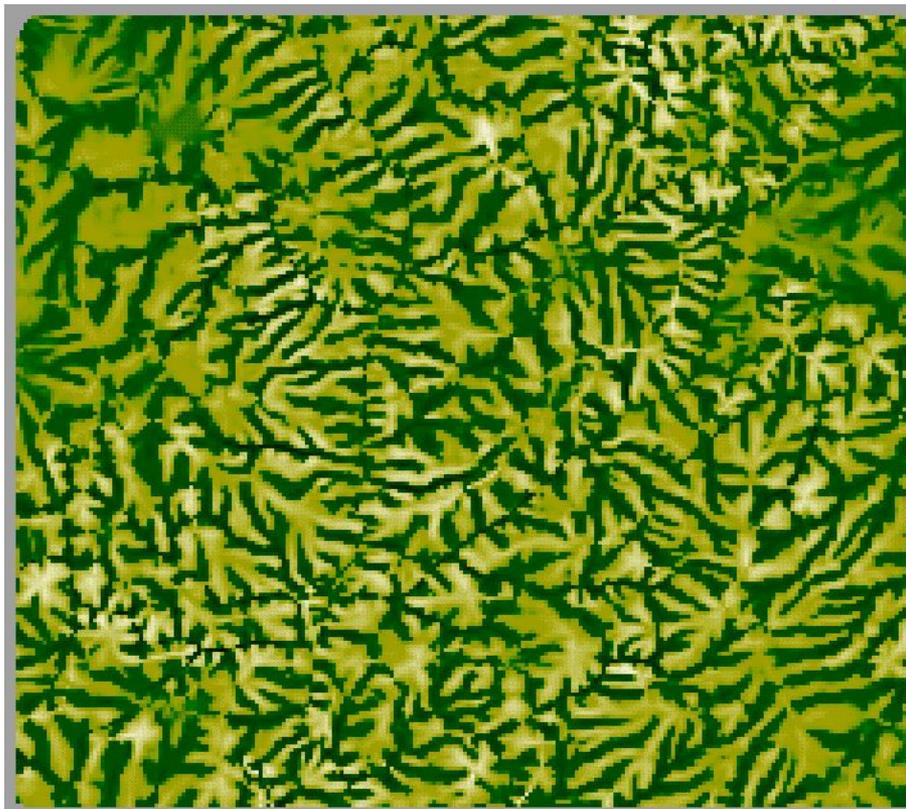
и сравнивая это выражение с (6), находим  $dGF/du = k_v$ . Теорема доказана.

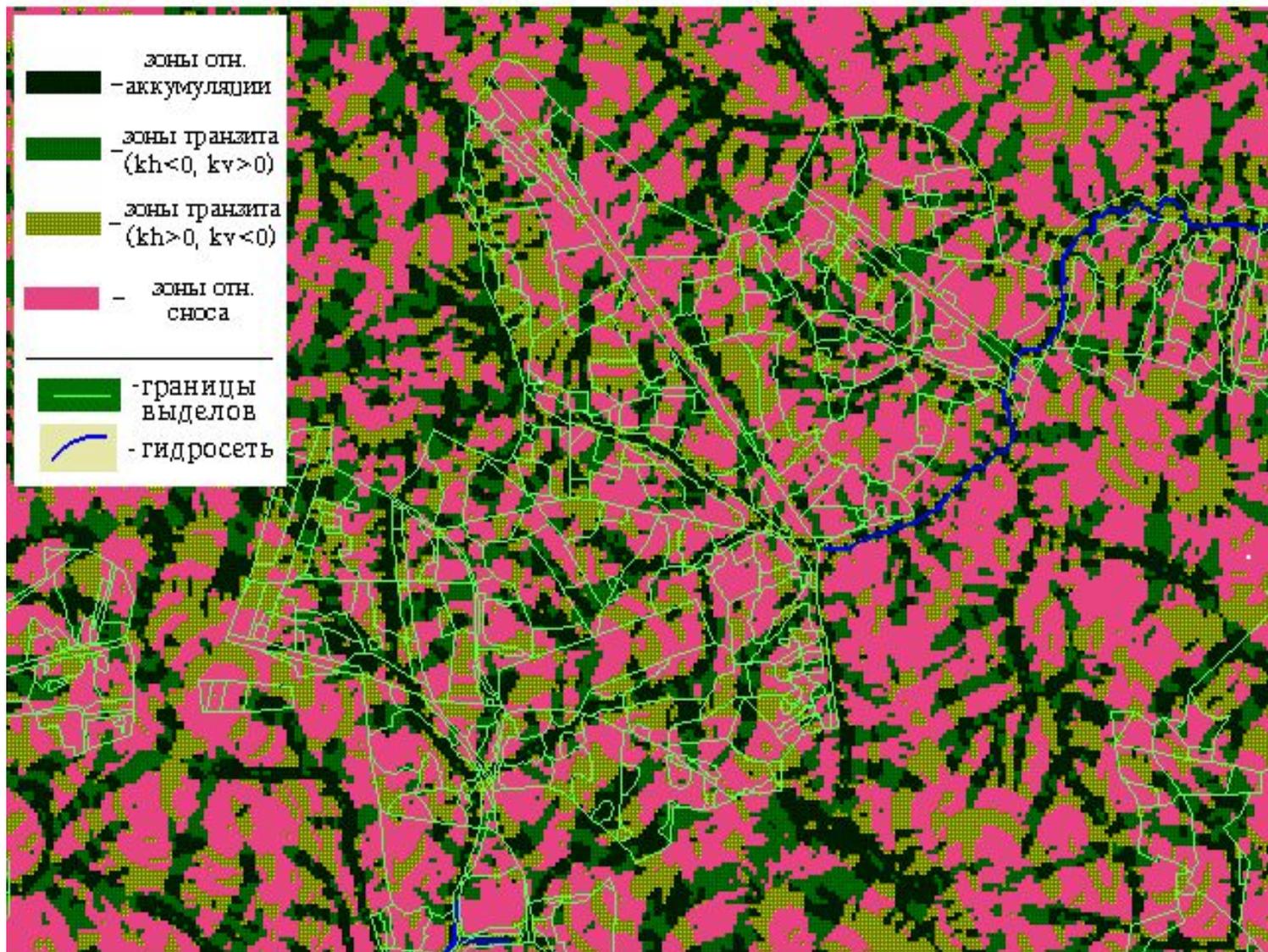
Второй механизм аккумуляции - фактор крутизны (а с ним и крутизна) уменьшается при смещении вдоль линии тока вниз по склону на вогнутых по профилю участках (где  $k_v < 0$ ), и увеличивается - на выпуклых (где  $k_v > 0$ ).



Горизонтальная кривизна  $Kh$  (слева) и вертикальная кривизна  $Kv$  (справа).

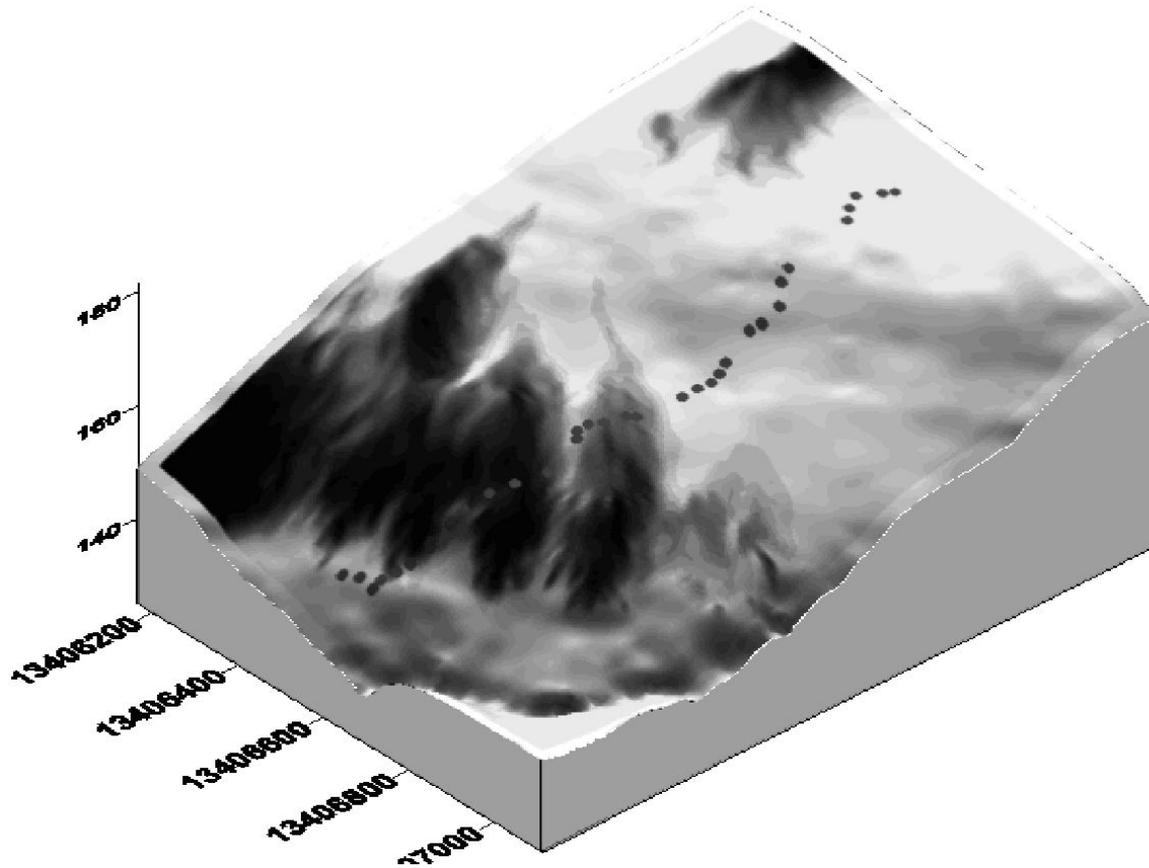
Светлый цвет – области выноса; темный – области аккумуляции





Карта зон относительной аккумуляции и сноса (элементарных геосистем) леспаркхоза «Горки» в южной части Подмосковья.

## Предсказанные зоны аккумуляции для участка «Данки» (Приокско-террасный Заповедник).



Вероятные места обнаружения зоны аккумуляции показаны темным (чем темнее, тем выше вероятность). Точками показан трансект, на котором получены эмпирические данные [Шарый, 2016]. Подходящая функция связи для биномиальное распределения известна как логит,  $\text{logit}(W)=\ln[W/(1-W)]$ , где  $W$  есть вероятность наличия; соответствующая модель логит-регрессии уравнение  $\ln[W/(1-W)]=a \cdot X+b \cdot Y+c$ .

### Уравнение множественной логит-регрессии

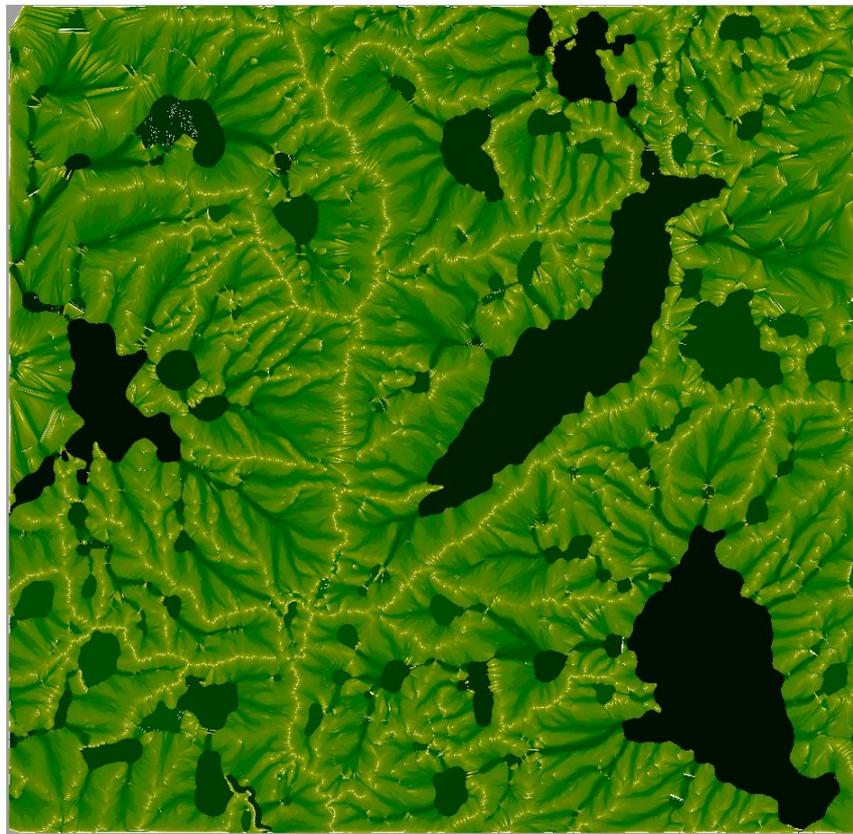
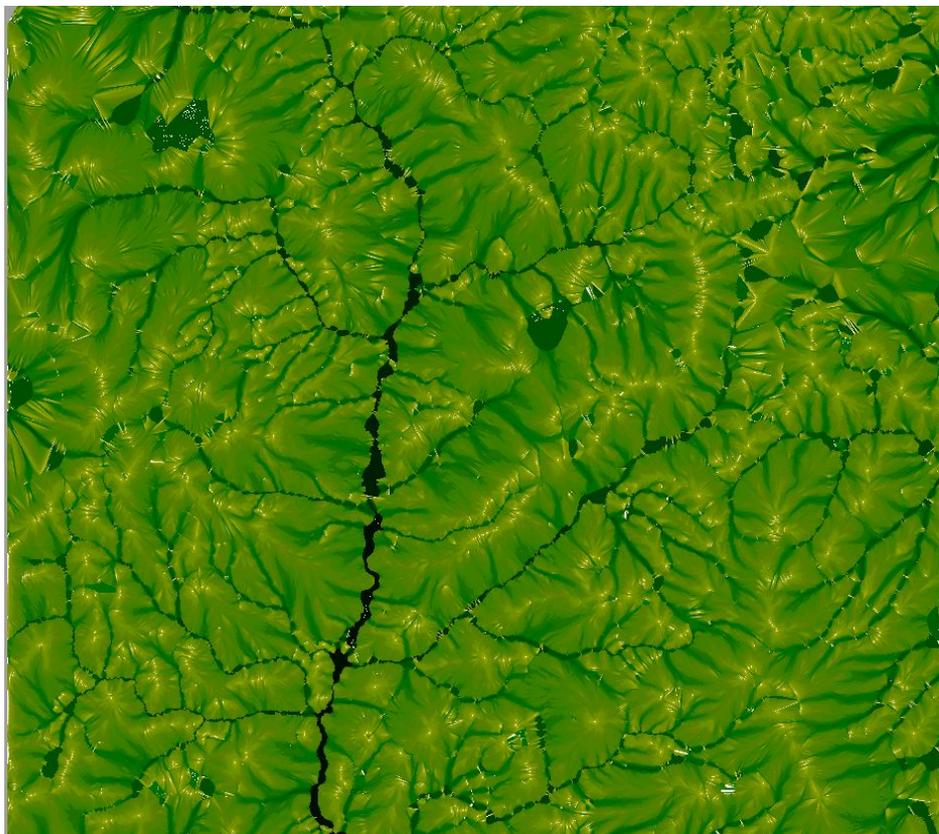
$$Z_{\text{CP}}=158.8 \text{ м}, kh_{\text{SD}}=0.0004922 \text{ 1/м}, \text{ критическое значение } t\text{-статистики } t_{0.05,28}=2.048.$$

$$\ln[p/(1-p)]_{\text{A33}} = -0.02342 \cdot Y_{-14.90} + 0.003600 (Z-Z_{\text{CP}})_{+9.82}^3 + 7.340 \cdot \sin(A_0)_{+5.78} + 0.6787$$

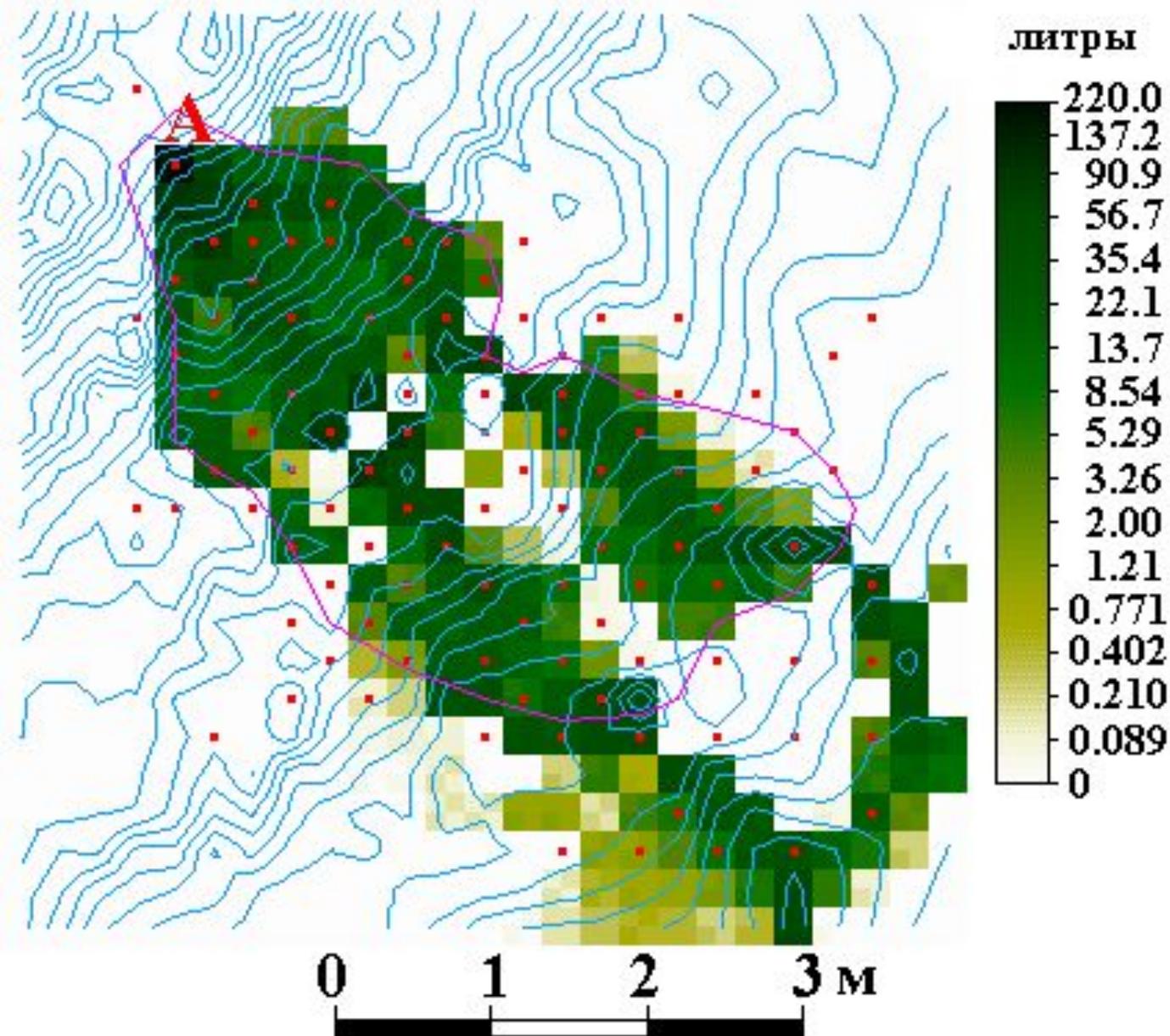
$$\cdot kh^{\Pi}_{+2.95} + 142562,$$

$$R^2 = 0.897 \text{ (Degr= 5.3\%)}, P < 10^{-6}.$$

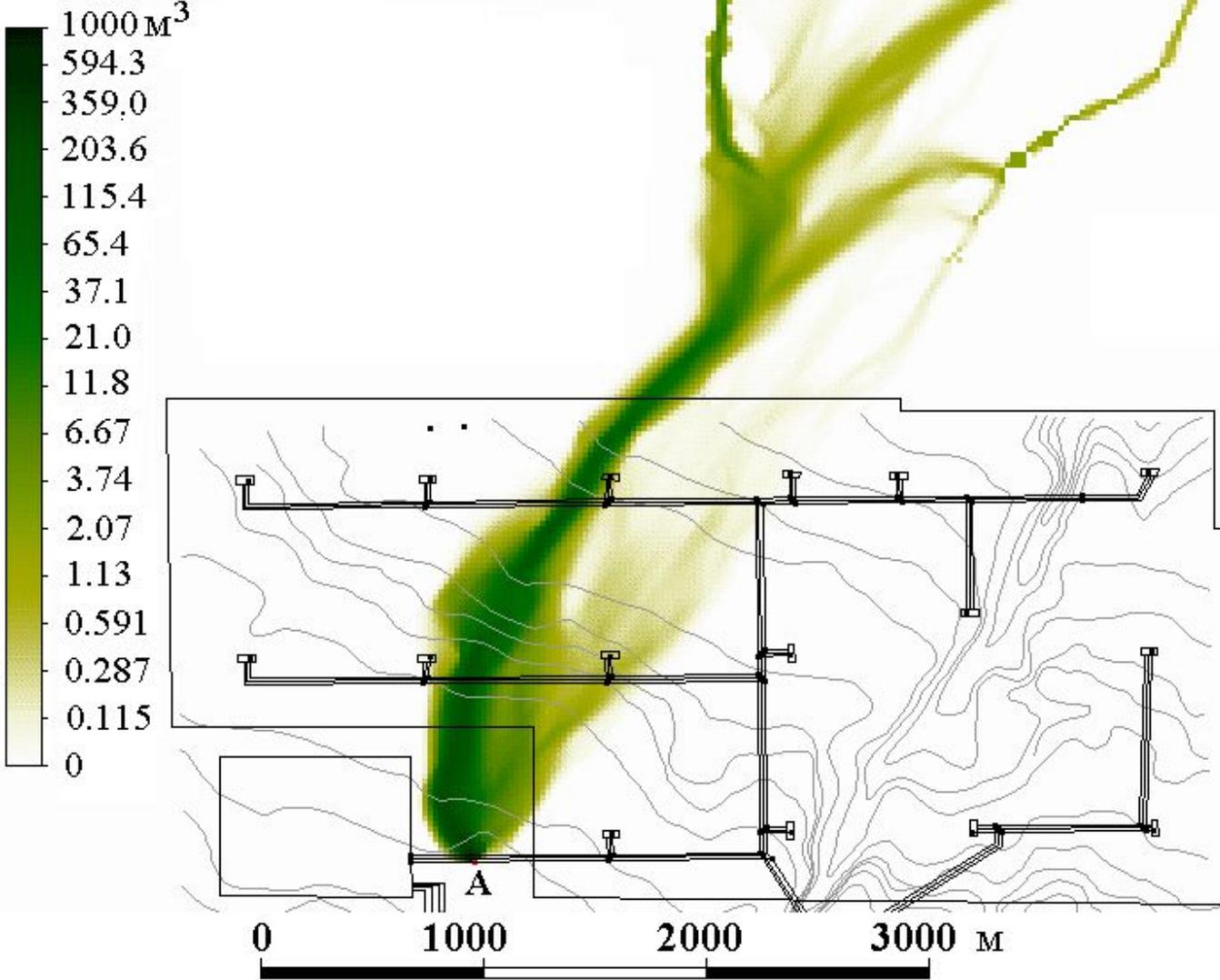
**Удельная площадь водосбора (слева) и дисперсивная площадь (справа).**  
Темные пятна на правой карте – моренные холмы и гряды



## Эксперимент по разливу нефти в ландшафте.



В точке А выдито 220 литров сырой нефти. Линии – горизонтали, точки – места отбора проб, контур – область поверхностного загрязнения, оттенками показана область распространения. Хорошо видна реальность разветвления нефти при ее течении по земле. На каждом холмике нефть разветвлялась, сливаясь следом за ним.



**Максимальное распространения нефти из разрыва трубопровода в кусте (расчет по дисперсивной площади). Цветом показано количество нефти, прошедшей через данный пиксель. Кривые – горизонталы, прямые - трубопроводы, ограждения**

# Верификация теоретических морфометрических величин по полевым данным

# **Верификация теоретических морфометрических величин по полевым данным**

Морфометрическая дневная доза прямой солнечной радиации 22 июня и 22 декабря на северо-восточном побережье Черного моря  
(Зайцев, 2001)

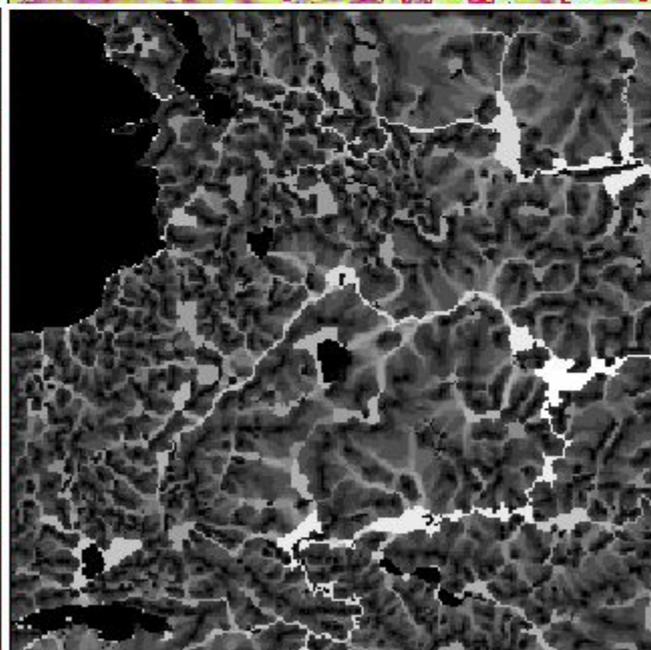
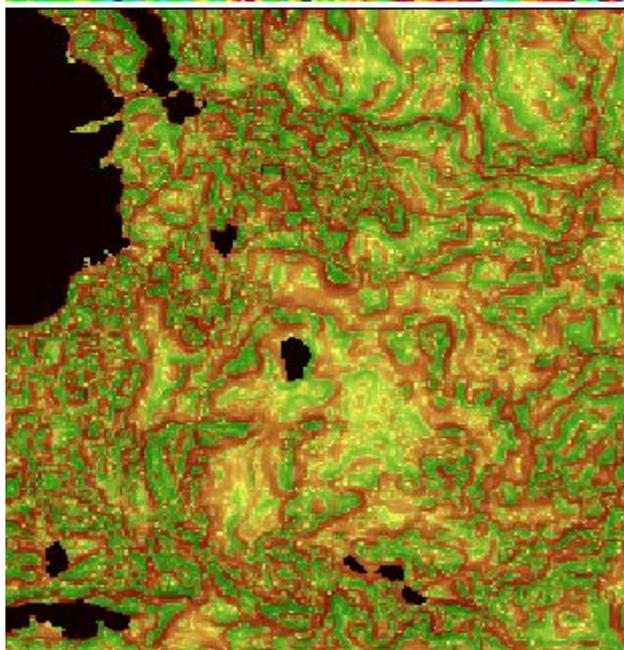
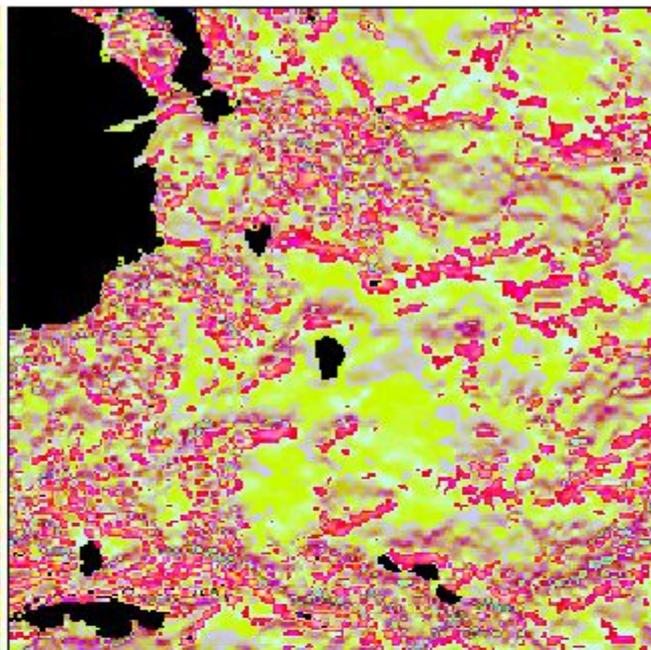
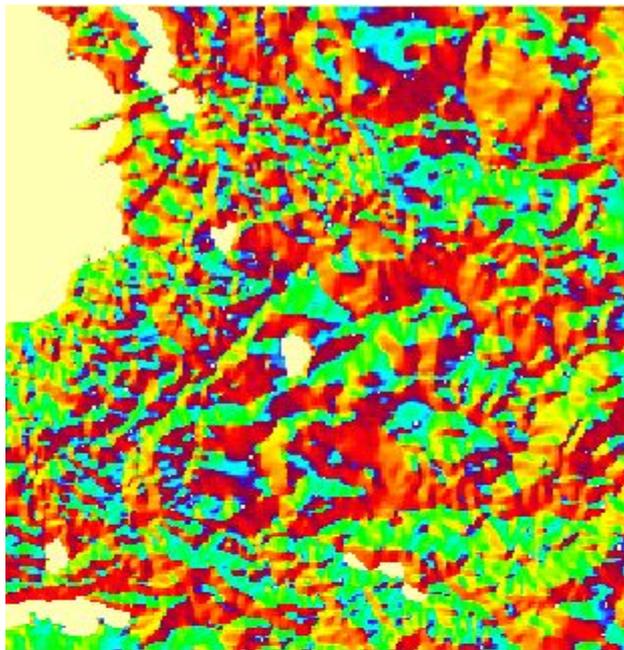
### 3. Общий алгоритм определения однородной территории по параметрам

- создание **метрического пространства параметров** - выбор, обоснование методов получения и расчета содержательных величин, описывающих структурообразующие процессы
- создание **пространства географических координат** - выбор масштаба, создание цифровой модели рельефа с заданным разрешением и т.д.
- отображение пространства параметров на пространство координат - **создание матрицы**, где столбцы - параметры, а строки - координаты элемента, к которому относятся параметры.
- задание **метрики пространства** и создание **матрицы дистанций**
- задание **меры (признака) однородности**.
- определение однородной территории по пространству параметров.

## Выбор и группировка **морфометрических величин (МВ)**, описывающих **градиенты полей гравитации и инсоляции**

- МВ описывающие факторы перераспределения солнечной (и тепловой) энергии: экспозиция и освещенность склонов; уклон; высота; доза прямой солнечной радиации (дневная, годовая).
- МВ описывающие распределение и аккумуляцию воды под действием силы тяжести: уклон; удельная площадь сбора и удельная дисперсивная площадь; глубина *В*-депрессий и высота *В*-холмов.
- МВ описывающие механизмы перераспределения вещества под действием гравитации: уклон; высота; горизонтальная и вертикальная кривизна.

Наименьшими **материальными точками**, из которых состоят пространственно-территориальные комплексы, **выступают элементы поверхности рельефа** (практически пиксели цифровой модели местности), **имеющие географические координаты**, а их **состояние описывается параметрами градиентов геофизических полей**.

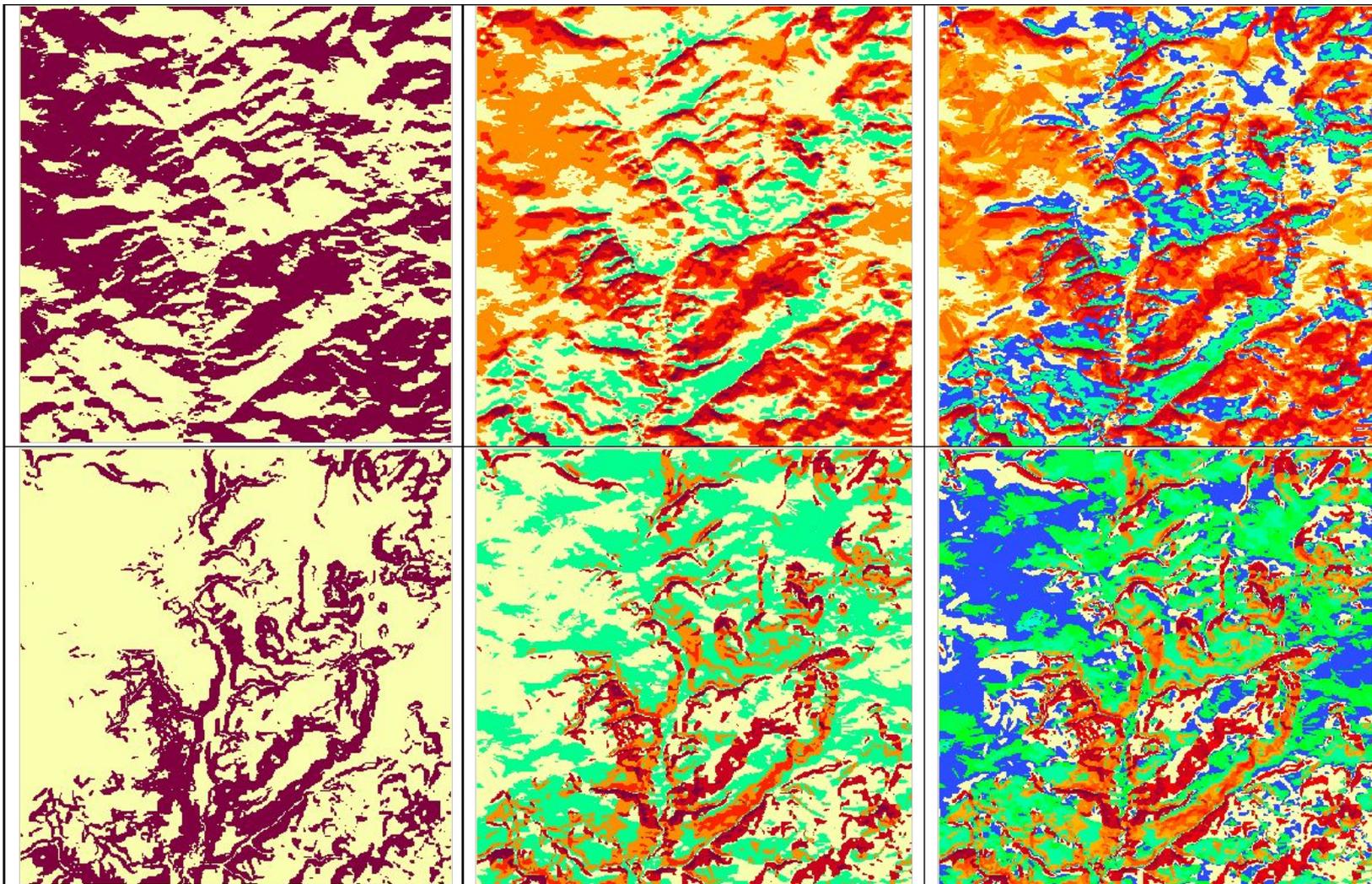


**Морфометрические  
параметры рельефа  
Национального  
парка «Валдайский»:**

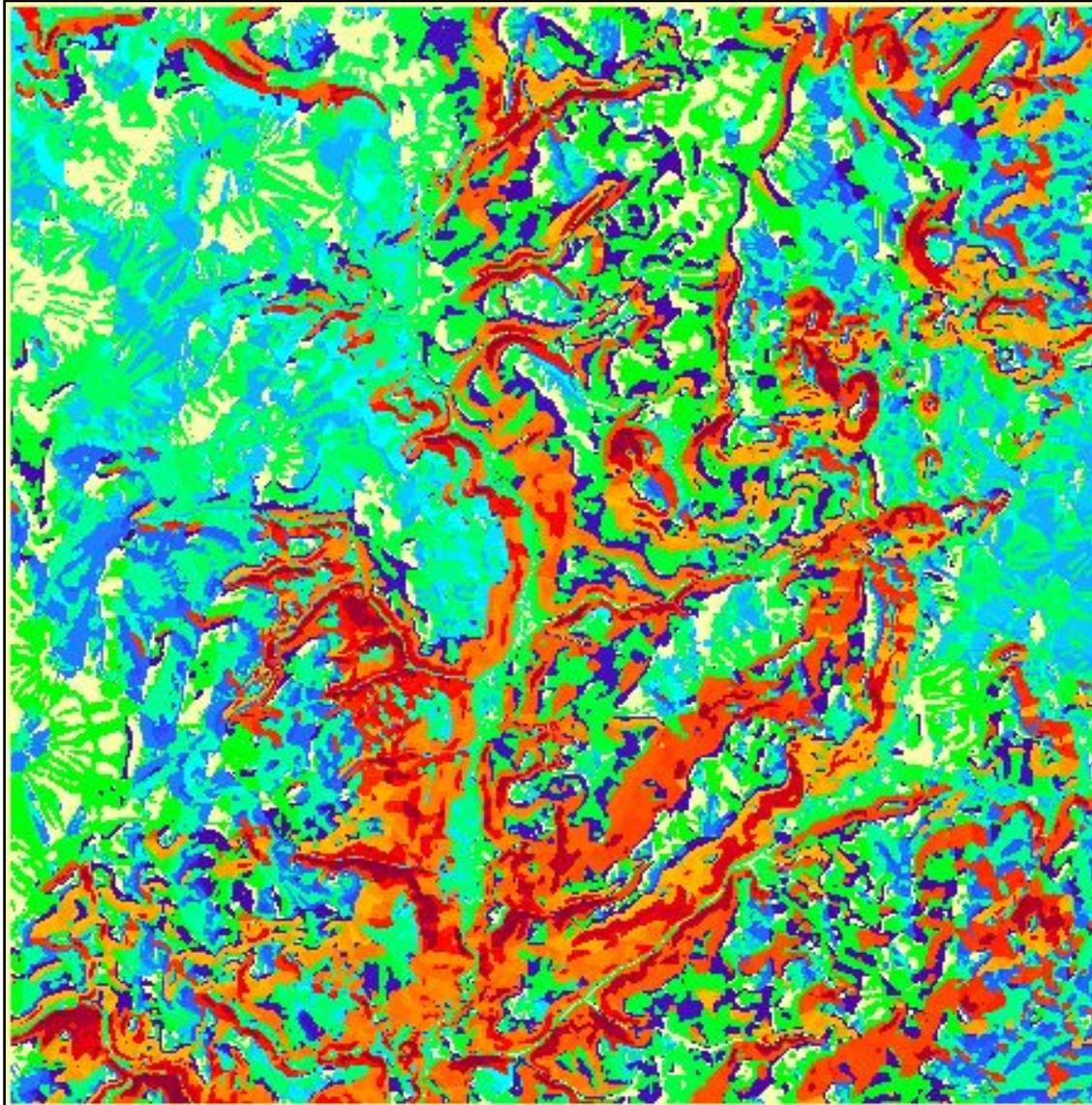
ориентация склонов -  
(слева),  
относительная  
величина годового  
радиационного  
баланса – справа,

вертикальная  
кривизна – слева,  
удельная площадь  
водосбора – справа

# Классификация поверхности рельефа ЦЛГПБЗ по параметрам перераспределения прямой солнечной радиации и тепла



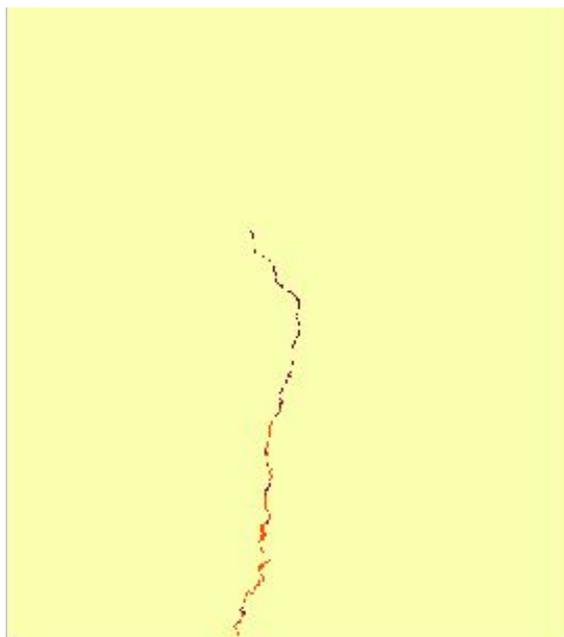
# Дифференциация поверхности рельефа по морфометрическим параметрам распределения солнечной радиации и тепла



- Наиболее теплые хорошо дренируемые склоны моренных холмов и гряд южной экспозиции с максимальной инсоляцией
- Теплые дренируемые склоны моренных холмов и гряд южной и северной экспозиций со средней инсоляцией
- Умеренно прохладные увлажненные склоны моренных холмов южной и северной экспозиций со средней инсоляцией
- Прохладные переувлажненные нижние части склонов холмов, моренных гряд и террасовидных уступов
- Холодные выпуклые центральные части болот
- Холодные плоские поверхности болот
- Холодные поверхности плоских болот и слабонаклонных заболоченных поверхностей
- Холодные слабонаклонных болотных поверхностей, долин рек и плоских заболоченных поверхностей холмов и террасовидных уступов
- Холодные плоские заболоченных поверхностей

# Классификация поверхности рельефа по параметрам, характеризующим гидрологические условия.

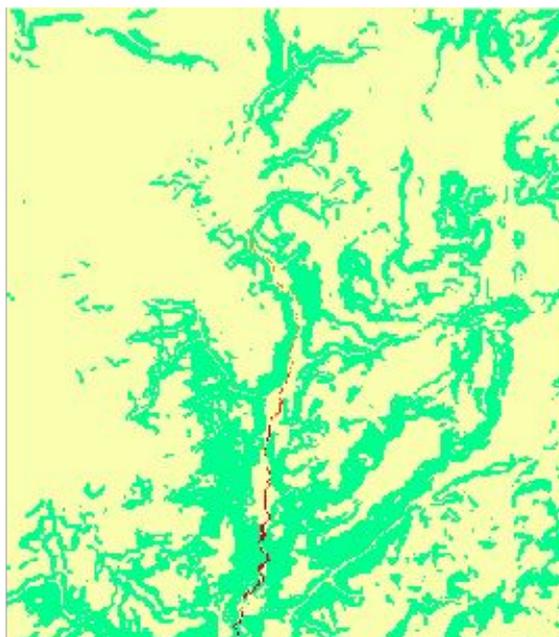
## Проверка корректности методами дискриминантного анализа



Количество переменных: 3; Группировка:  
L1 (2 Wilks' Lambda: .18681 approx  
F(1,205179)=2233E2 p<0.0000

	Wilks' Lambda	Partial Lambda	F-remove	p-level
N=205184			1.205E3	
SCAREA	.986791	.189311	878640.8	0.00
HEIGHTZ	.187062	.998655	276.4	0.00
SLOPE2	.187183	.998011	408.9	0.00

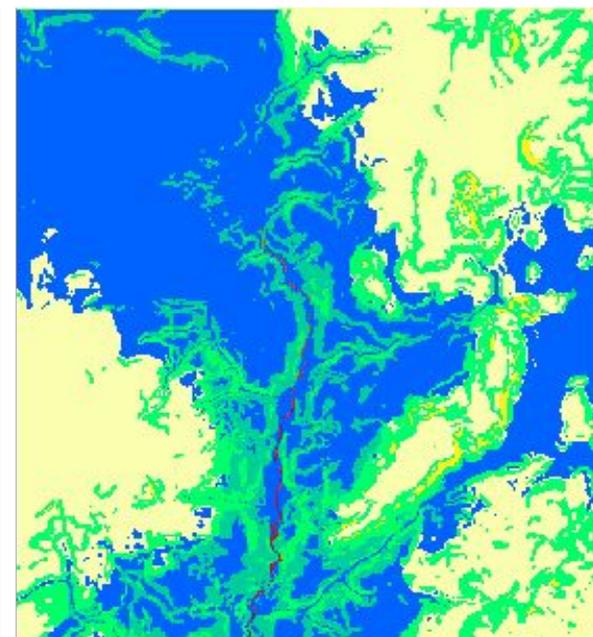
SCAREA- удельная площадь водосбора



Количество переменных: 3; Группировка:  
L3 (8 Wilks' Lambda: .02097 approx  
F(7,739763)=50747. p<0.000

	Wilks' Lambda	Partial Lambda	F-remove	p-level
N=205184			1.205E3	
SCAREA	.220735	.095006	279200.3	0.00
HEIGHTZ	.021349	.982323	527.4	0.00
SLOPE2	.092592	.226490	100101.0	0.00

HEIGHTZ-высота

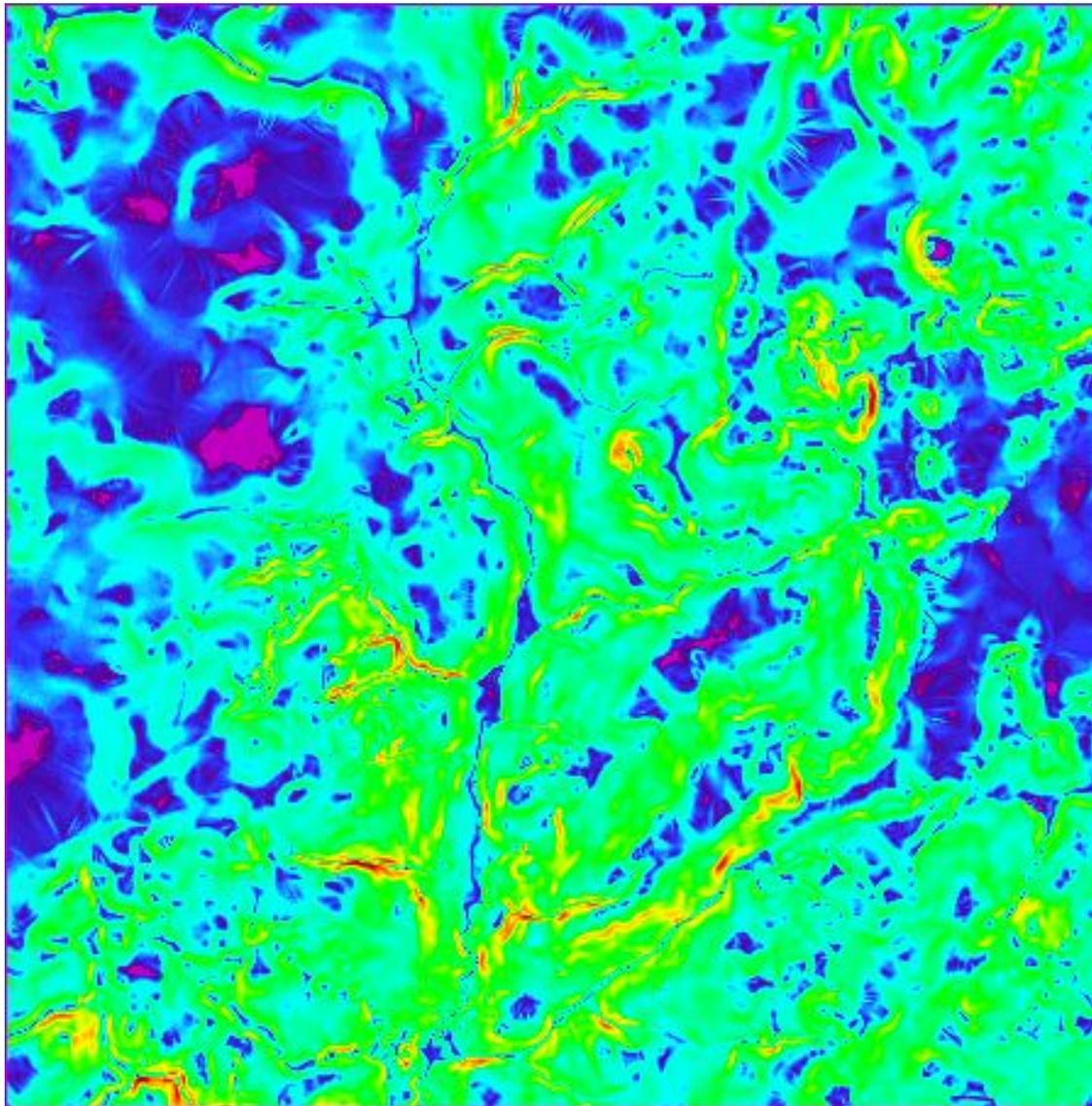


Количество переменных: 3; Группировка:  
L5 (24 Wilks' Lambda: .00346 approx  
F(20,22037)=28112. p<0.000

	Wilks' Lambda	Partial Lambda	F-remove	p-level
N=205184			23.205E3	
SCAREA	.085241	.040610	210728.4	0.00
HEIGHTZ	.005730	.604152	5844.4	0.00
SLOPE2	.020206	.171318	43146.2	0.00

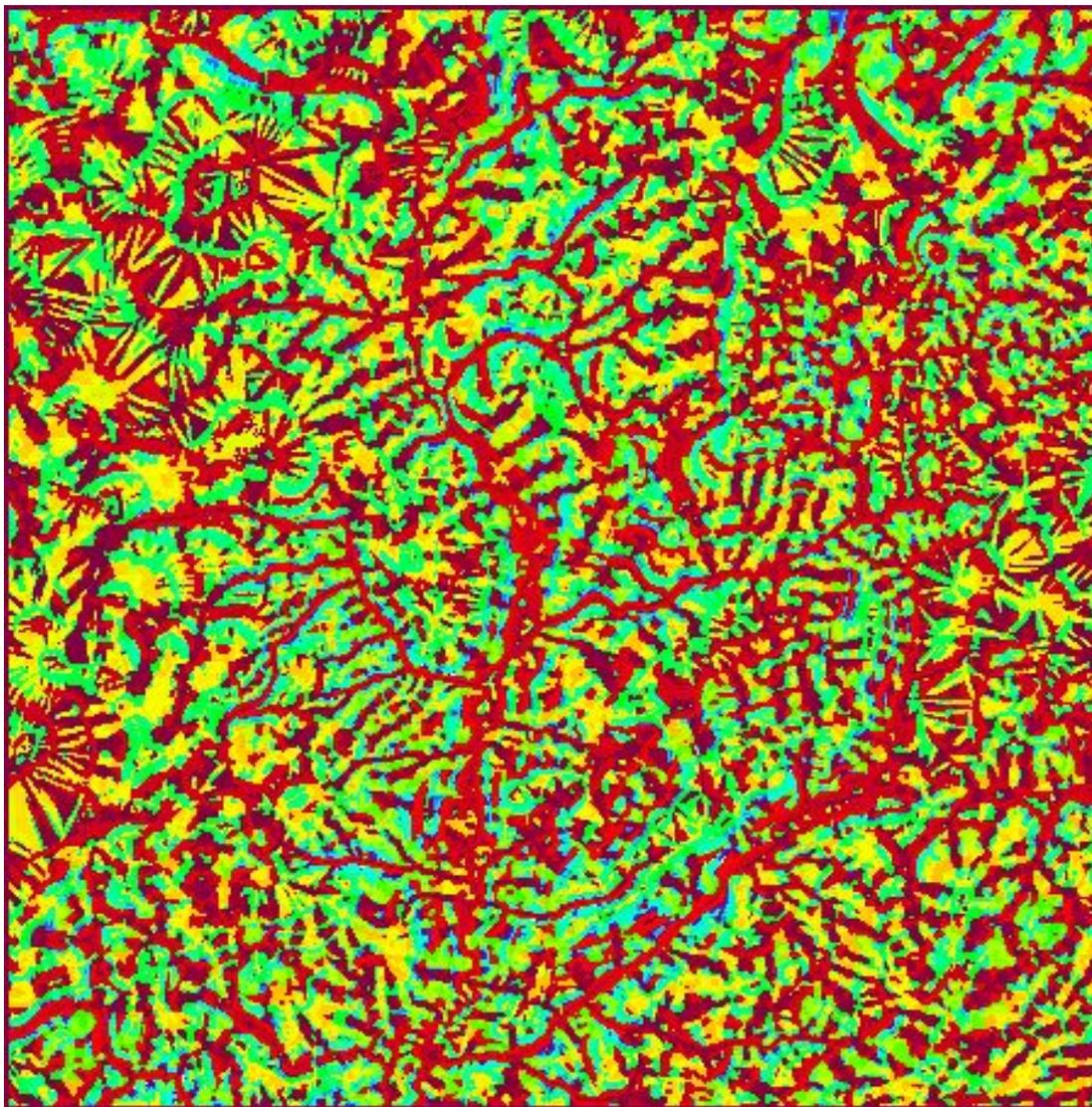
SLOPE2- весовым коэффициентом

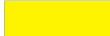
# Дифференциация рельефа по морфометрическим параметрам распределения гидрологического стока и заболачивания



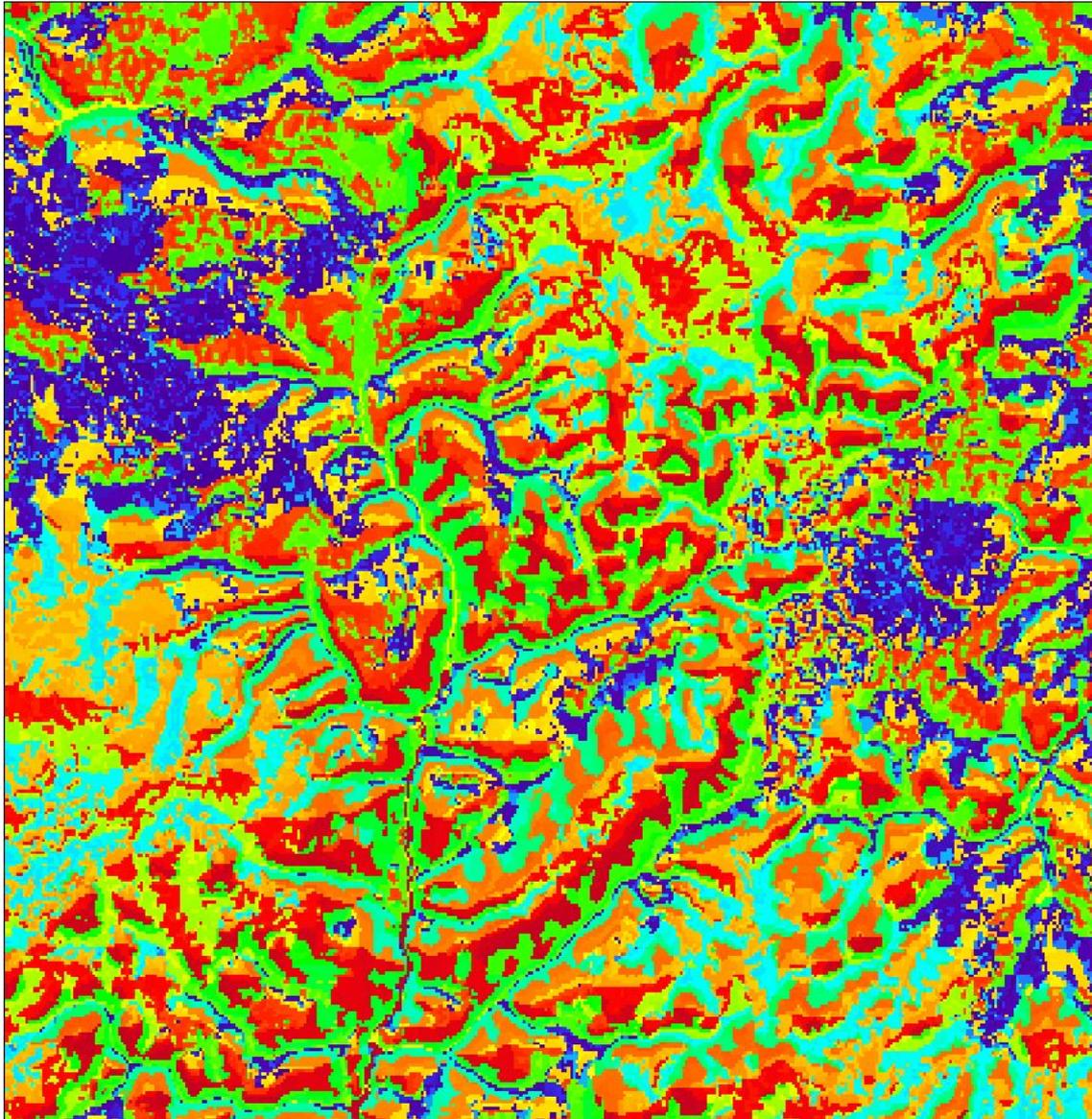
- Центральные выпуклые части болотных массивов
- Болотные массивы (верховые, переходные, низинные), долины рек
- Плоские заболоченные вершины холмов, периферийные участки болот
- Крайевые части болот
- Заболоченные нижние части склонов моренных холмов и гряд
- Пологие слабо дренируемые склоны моренных холмов и гряд
- Покатые дренируемые склоны моренных холмов и гряд
- Покатые хорошо дренируемые склоны моренных холмов и гряд
- Хорошо дренируемые склоны моренных холмов и гряд
- Наиболее крутые (до  $6^\circ$ ) хорошо дренируемые склоны моренных холмов и гряд

# Дифференциация рельефа по морфометрическим параметрам ландшафтно-геохимических механизмов переноса



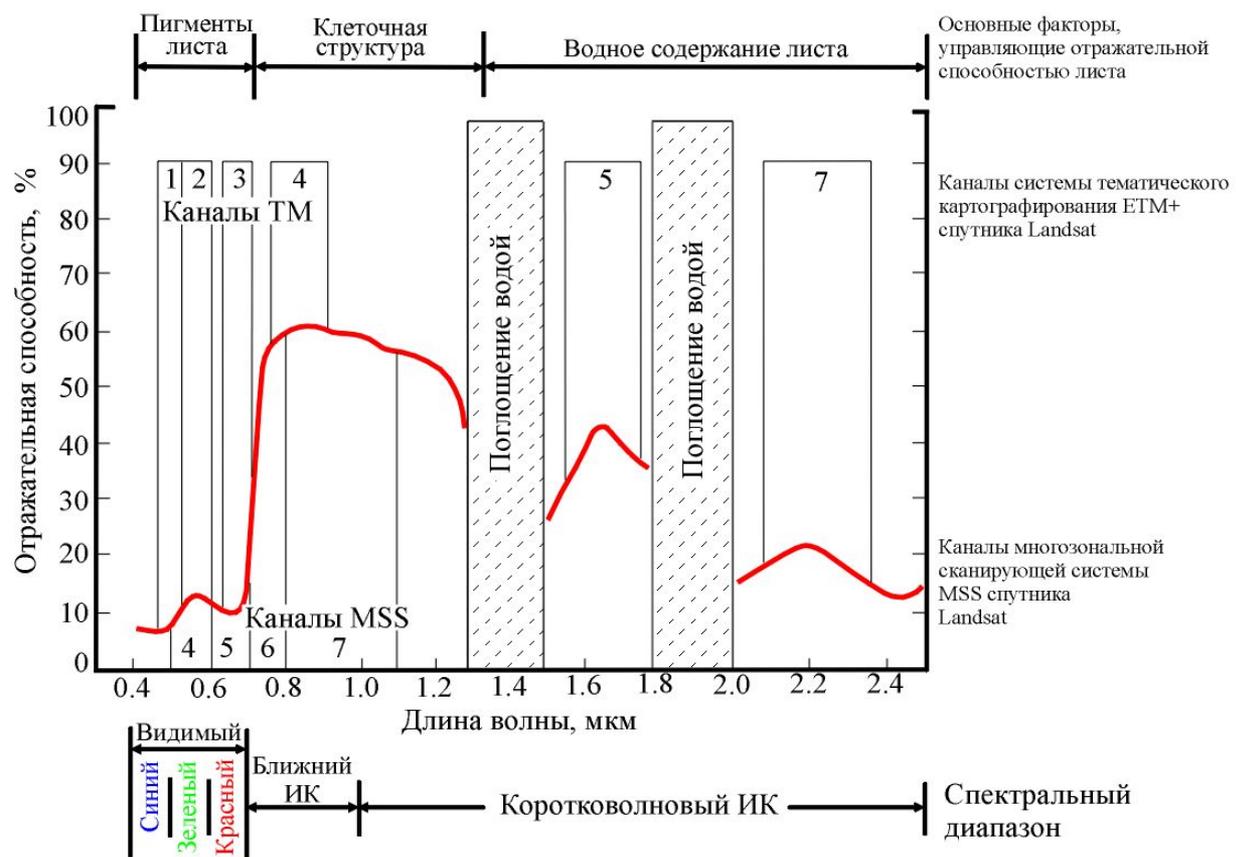
-  Автономные элювиальные
-  Элювиальные
-  Трансэлювиальные плоских и выпуклых склонов
-  Трансэлювиальные вогнутых склонов
-  Трансэлювиально-аккумулятивные
-  Трансаккумулятивные
-  Супераквальные трансаккумулятивные
-  Супераквальные аккумулятивные

# Дифференциация рельефа по параметрам распределения геофизических полей.



- Orange** Пологие склоны моренных холмов и гряд южной экспозиции, наиболее теплые, хорошо дренируемые, трансэлювиальные
- Light Green** Плоские поверхности вершин моренных холмов, гряд и террасовидных уступов, теплые дренируемые, элювиальные
- Yellow** Склоны моренных холмов и гряд северной экспозиций, умеренно теплые, дренируемые, трансэлювиальные
- Bright Green** Склоны северной экспозиции прохладные, слабодренируемые, трансэлювиальные
- White** Плоские поверхности болот в ложбинах стока и котловинах, холодные, переувлажненные, супераквальные, трансэлювиальные и трансаккумулятивные
- Cyan** Плоские заболоченные поверхности моренных холмов, гряд и террасовидных уступов, плоские ложбины стока, частично с временными или постоянными водотоками, периферийные части верховых болот, холодные, переувлажненные, супераквальные трансаккумулятивные
- Blue** Долинный комплекс р. Межи с низинным заболачиванием, умеренно холодные, супераквальные, аккумулятивные и трансаккумулятивные

# Характеристический спектр зеленого листа в сравнении с каналами пропускания систем MSS и ETM+ спутника Landsat [Гоуц, Уэллман, Барнс, 1985]



Landsat 7 ETM+		b8				
Номер канала	b1	b2	b3	b4	b5	b7
Границы, мкм	.450–.515	.525–.605	.630–.690	.775–.900	1.550–1.750	2.090–2.35
Разрешение, м/пиксел	30	30	30	30	30	30
Название канала	голубой	зеленый	красный	ближний инфракрасный	коротковолновый инфракрасный	коротко-средневолновый инфракрасный

# Физическая информация спектральных каналов съемки LANDSAT.

## 1 канал (голубой):

Наиболее чувствителен к атмосферным газам, изображение канала пестрее остальных;

Волны диапазона имеют наибольшую водопроницаемость, данный канал оптимален для изучения **подводной растительности, мутности воды**, водных осадков и загрязнения воды;

Полезен для выявления **дымовых факелов**, т.к. короткие волны легче рассеиваются маленькими частицами;

Хорошо отличает облака от **снега и горных пород, а также голые почвы** от участков с растительностью.

## 2 канал (зеленый):

Чувствителен к мутности воды, осадочным шлейфам и факелам выбросов;

Охватывает **пик отражательной способности поверхностей листьев**, полезен для различения обширных классов растительности;

Полезен для изучения подводной растительности, факелов выбросов, мутности и осадков.

## 3 канал (красный):

Чувствителен в **зоне сильного поглощения хлорофилла, и растительности**;

Чувствителен в зоне высокой отражательной способности большинства почв; используется для картографирования снежного покрова.

#### **4 канал (ближний инфракрасный):**

Связан со **свойствами растительности**.

Максимально чувствителен к различиям **породного состава**.

#### **5 канал (коротковолновый инфракрасный):**

Чувствителен к **содержанию воды в тканях листьев** (отражательная способность уменьшается при возрастании содержания воды); полезен для определения энергии растений и отделения суккулентов от древесной растительности;

Чувствителен к **наличию трехвалентного железа в горных породах**

отражательная способность возрастает при увеличении количества  $Fe^{+3}$ ;

**Отличает лед и снег** (светлый тон) от облаков (темный тон).

#### **6 канал (длинноволновый инфракрасный или тепловой):**

Измерение **температуры излучающей поверхности** от  $-100$  до  $+150^{\circ}C$  (дневное и ночное);

Применение съемки: **анализ влажности почв**, типов горных пород, выявление **теплового загрязнения** воды, бытового скопления тепла, источников городского производства тепла, эффективное военное наведение,

инвентаризация живой природы, выявление **геотермальных зон**.

#### **7 канал (средний или коротковолновый инфракрасный):**

Совпадает с полосой поглощения излучения гидроминералами (глинистые минералы, некоторые оксиды и сульфаты); полезен для литологической съемки;

Чувствителен к варьированию влаги в растительности и почвах.

**1. Нормализованный разностный вегетационный индекс (Normalized Difference Vegetation Index ). NDVI** вычисляется как отношение значений спектральной яркости в красной и ближней инфракрасной зонах спектра:  $NDVI = \frac{\text{ближний инфракрасный} - \text{красный}}{\text{ближний инфракрасный} + \text{красный}}$ .

Для каналов Landsat 7 формула следующего вида:

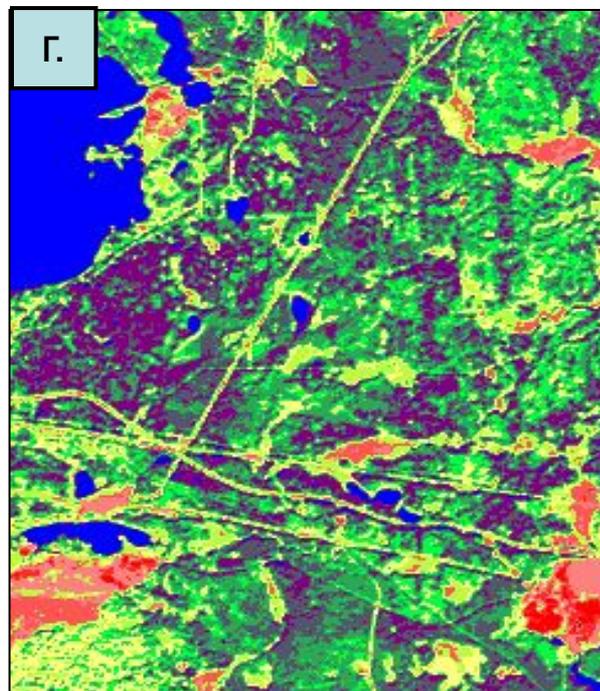
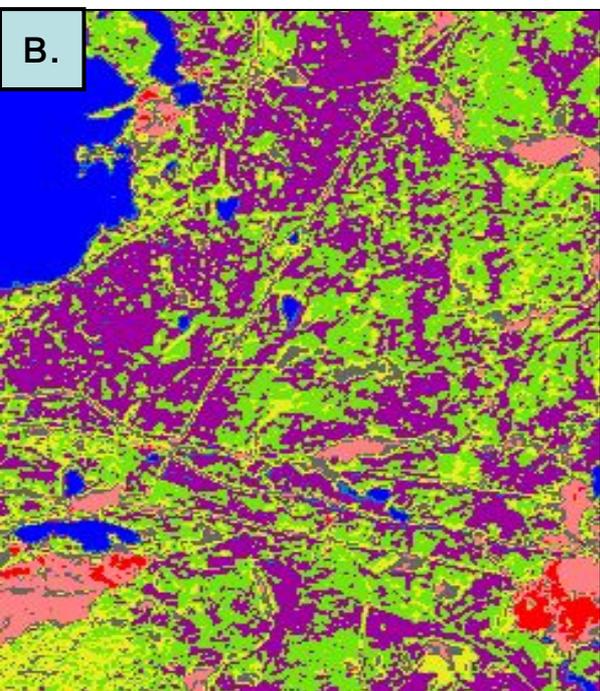
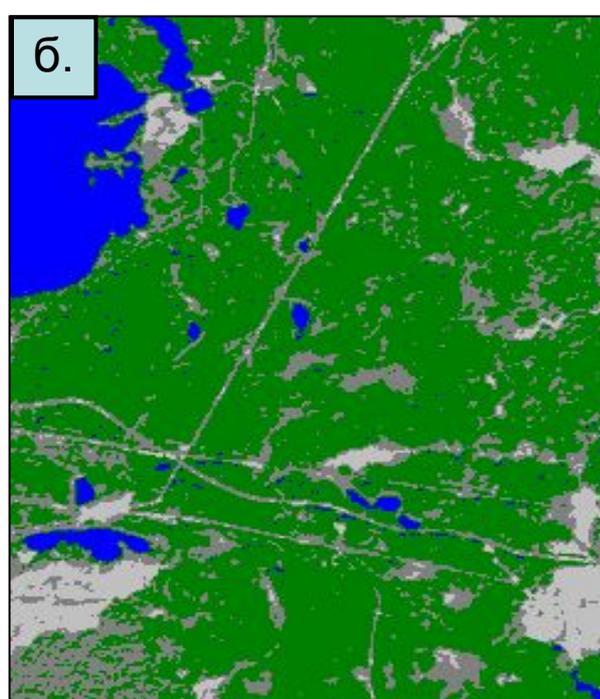
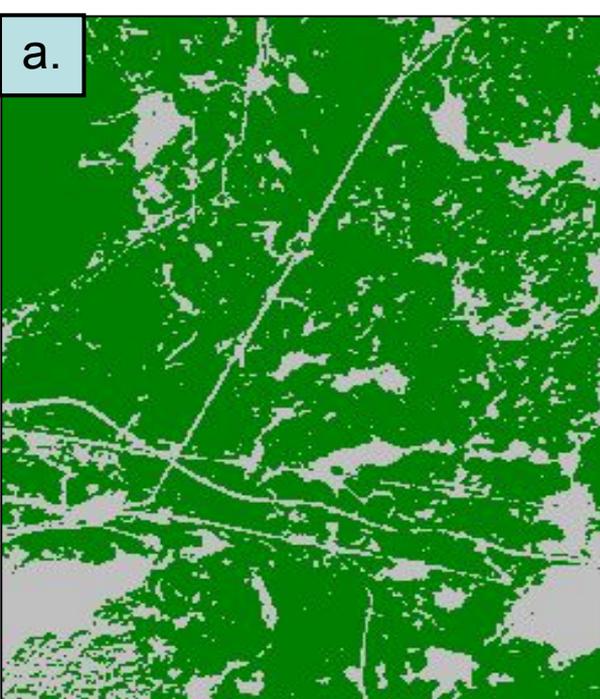
$$NDVI = \frac{\text{канал 4} - \text{канал 3}}{\text{канал 4} + \text{канал 3}}$$

**2. Нормализованный разностный снеговой индекс (Normalized Difference Snow Index ). NDSI** чувствителен к мощности снега, льда Для каналов Landsat 7 формула следующего вида:

$$NDSI = \frac{\text{канал 1} - \text{канал 4}}{\text{канал 4} + \text{канал 1}}$$

**3. Нормализованный разностный влажностный индекс (Normalized Difference Water Index ). NDWI**

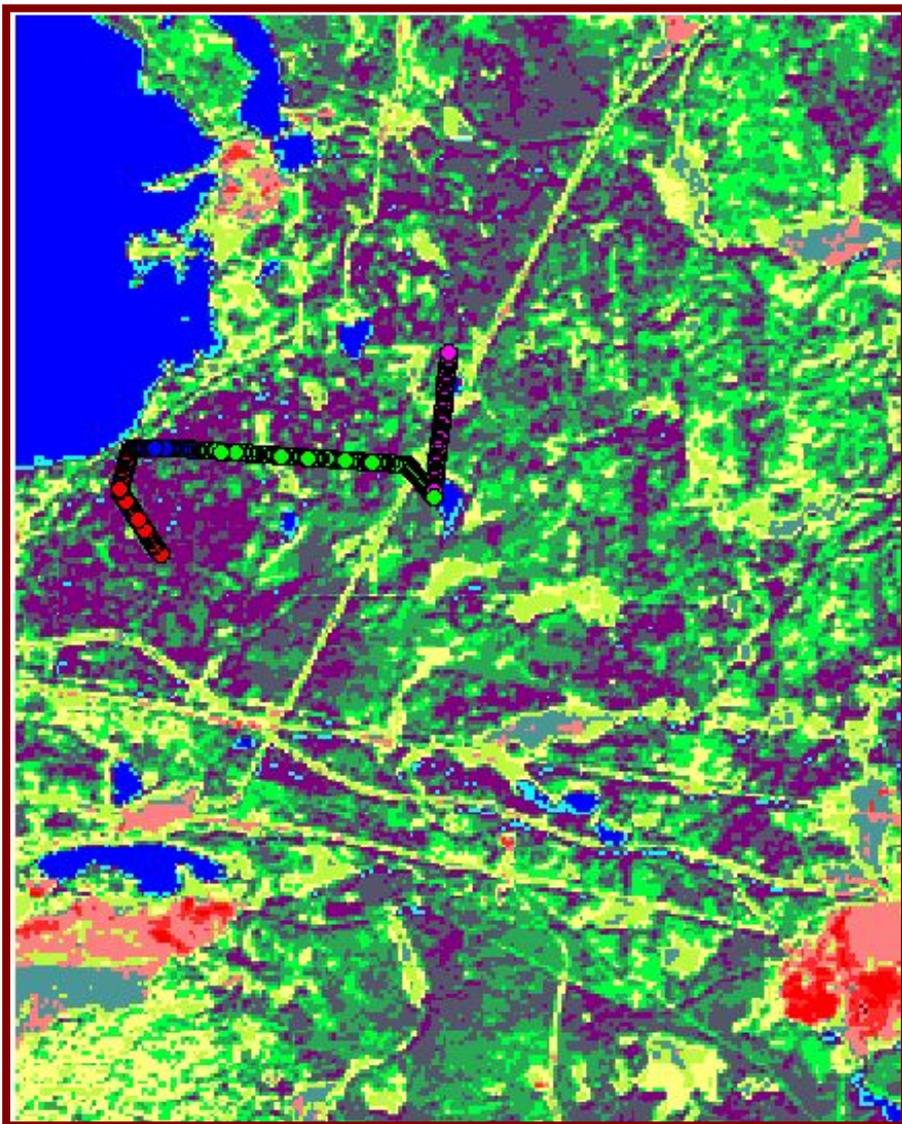
и др.



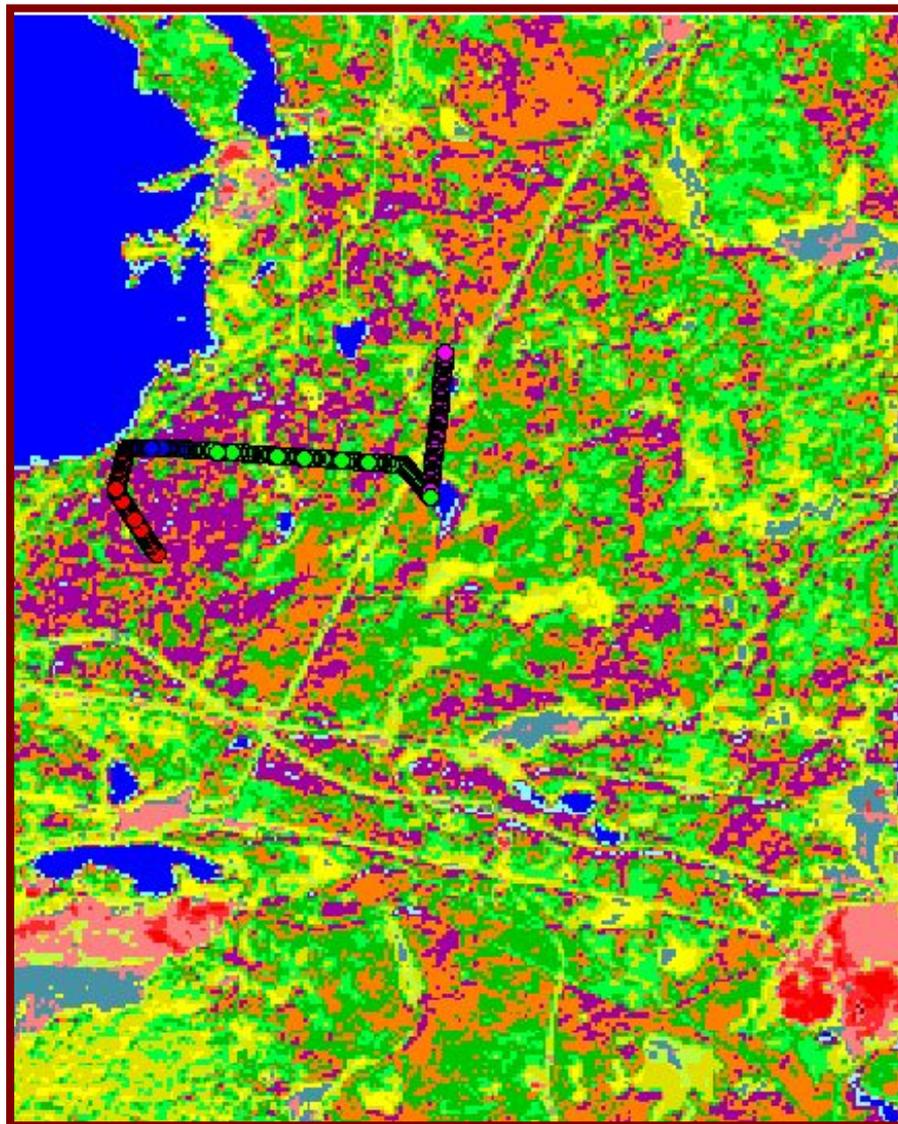
**Национальный парк  
«Валдайский»,  
дихотомическая  
классификация  
съемки Landsat 7  
с использованием метрики  
Евклида:**

- а) первый уровень (2 класса),
- б) второй уровень (4 класса),
- в) третий уровень (8 классов),
- г) четвертый уровень (16 классов)

# Идентификация физического содержания классов растительного покрова НП «Валдайский» на основе полевых данных



Интерпретация по априорным данным Landsat 7



Породный состав леса по данными сплошной ленточной лесотаксации

# Значение натуральных наблюдений в разработке теории геосистем

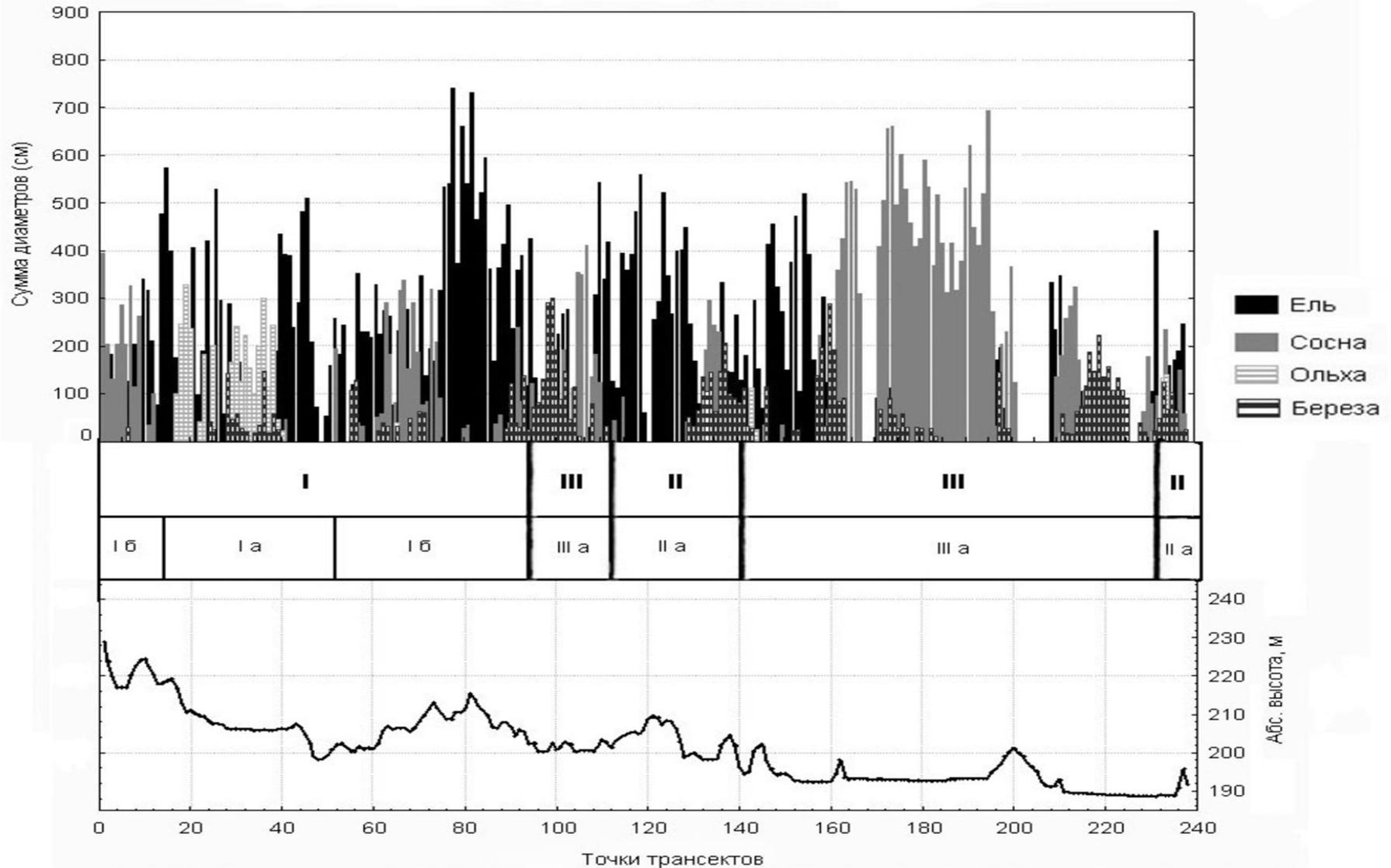
1. **Измерения в натуре** - важнейший источник физических параметров теоретических моделей геосистем.
2. Модель задает набор параметров, точность и дискретность их измерений
3. **Картирование** природных территориальных комплексов и их компонентов на ключевых территориях (трансектах) – важнейший метод верификации моделей и, следовательно, построения теории геосистем.
4. **Обеспечение цикла развития** «теория→эксперимент →теория →....»

## Методы полевых исследований

1. **Традиционные ландшафтные** и покомпонентные (геоботанические, лесотаксационные, почвенные и др.) полевые методы исследования и картографирования.
2. **Автоматизированные комплексы** стационарной и полустационарной регистрации физических и химических параметров приземных слоев атмосферы, природных вод и почв и растений.
3. **Методы прикладной геофизики** (сейсмические, гравитационные, электромагнитные, георадарные, и др.), мобильные и производительные автоматизированные методы мониторинга почвенных, литологических и гидрогеологических условий.

# Суммы диаметров пород в типичных ландшафтах НП «Валдайский»

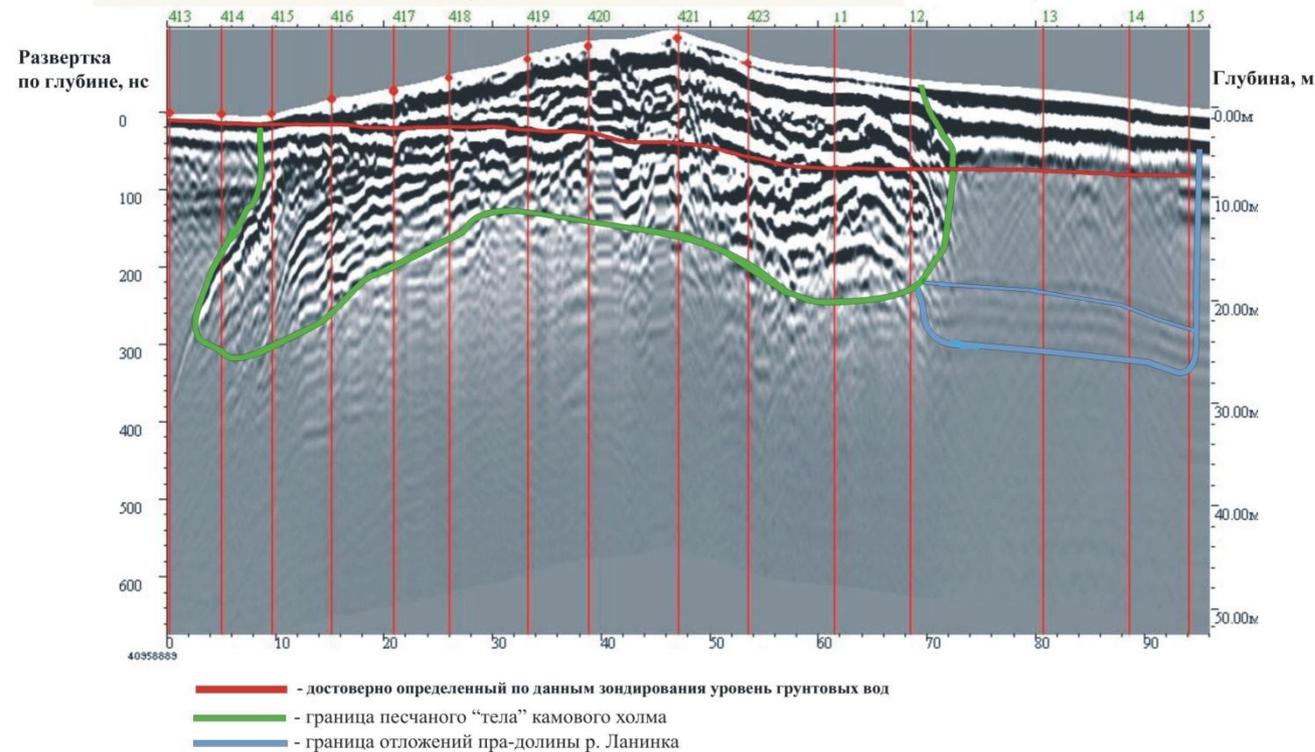
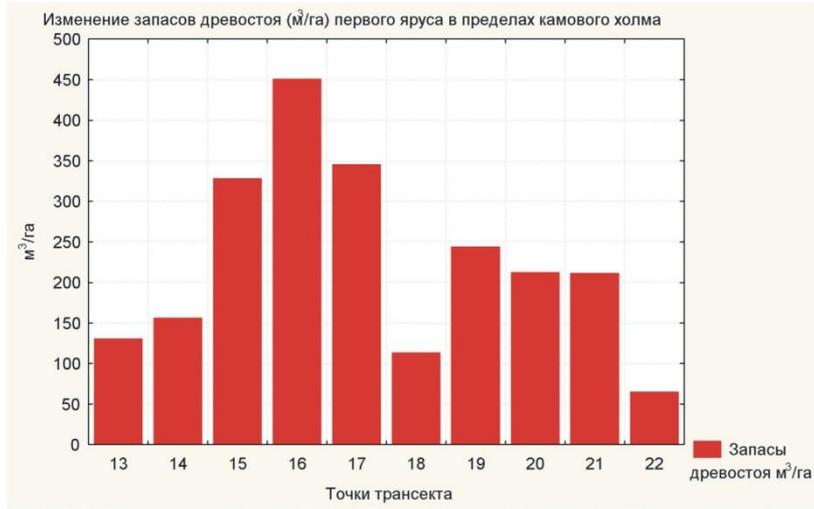
I - ландшафт грядово-холмистой моренно-камовой равнины; II - ландшафт грядово-котловинной камово-озовой равнины; III - ландшафт плоской озерно-водно-ледниковой равнины с грядами. Буквенные индексы характеризуют местности



## Интерпретация физического содержания классов древостоев на основе полевых описаний:

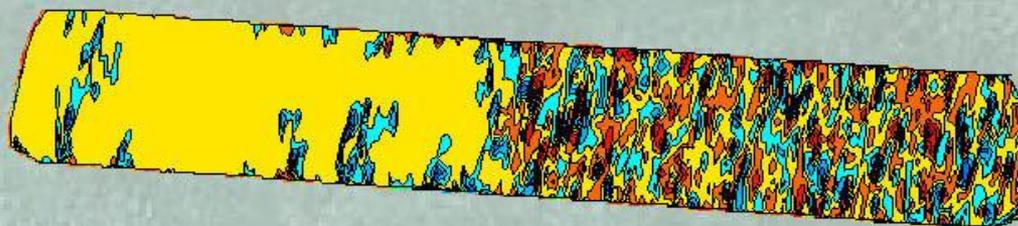
Классы	Сумма диаметров стволов (в см.)					Число точек	Древостой
	Всего	Ель	Сосна	Ольха	Береза и осина		
<b>4</b>	366.9	<b>303.0</b>	35.4	8.7	19.8	66	Еловые сомкнутые
<b>5</b>	328.1	197.8	85.2	18.4	26.8	59	Елово-сосновые и сосновые
<b>6</b>	390.9	157.1	132.8	<b>40.7</b>	<b>60.3</b>	50	Смешанные и елово-сосновые
<b>7</b>	430.5	90.3	<b>296.0</b>	7.5	36.6	25	Сосновые заболоченные
<b>8</b>	313.9	32.2	<b>221.7</b>	2.6	57.4	22	Елово-мелколиственно-сосновые окраин болот
<b>11</b>	290.8	114.6	<b>163.6</b>	1.9	10.8	9	Верховые болота с сосной и мелколиственными породами

# Сопряженный профиль изменения гидрогеологических условий и продуктивности древостоя ( $\text{м}^3/\text{га}$ ) в камово-западинном ландшафте



Параметры зондирования:  
 $\epsilon=4$ ,  
развертка – 800,  
накопление – 144.

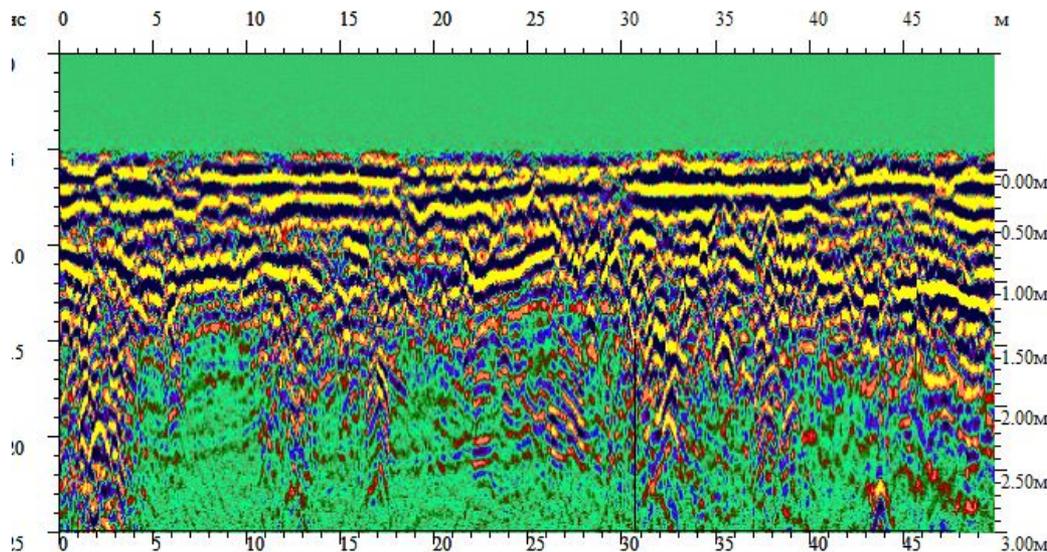
**Пространственная привязка линзы водонасыщенных флювиогляциальных песков, обнаруженной георадарной съемкой под покровными суглинками (площадной разрез на глубине 2,5 м)**



 Водонасыщенные флювиогляциальные пески

 Моренные суглинки и их делювий

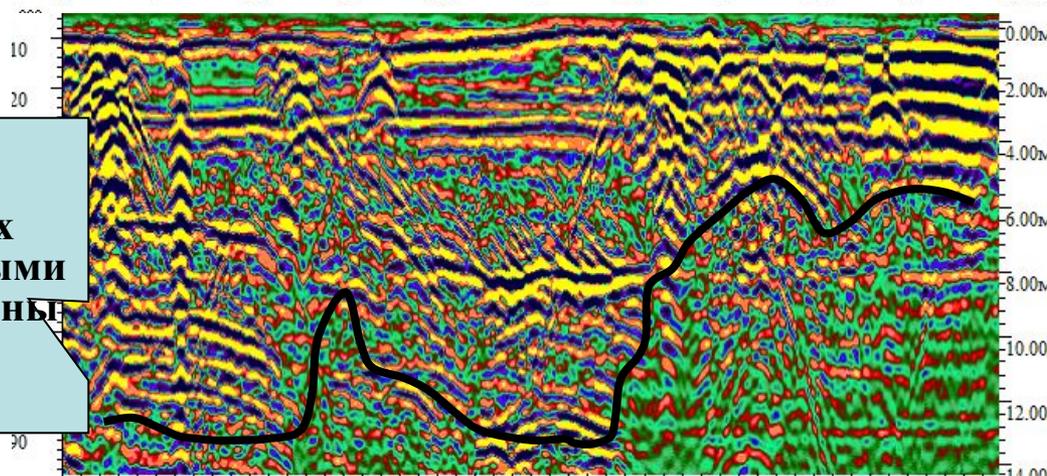
# Детализированные фрагменты радарограмм почв и четвертичных отложений ландшафтов вторично-моренных равнин



Горизонты почв

Палео-мерзлотные трещины в покровном суглинке до глубины 3,0 м

Радарограмма канал 700 MHz

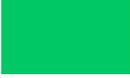
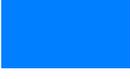


Линза водонасыщенных флювиогляциальных песков под покровными суглинками до глубины 6-14 м

Радарограмма канал 250 MHz

# Карта структуры ПТК на основе классификации рельефа по параметрам градиентов геофизических полей и космического снимка Landsat-7

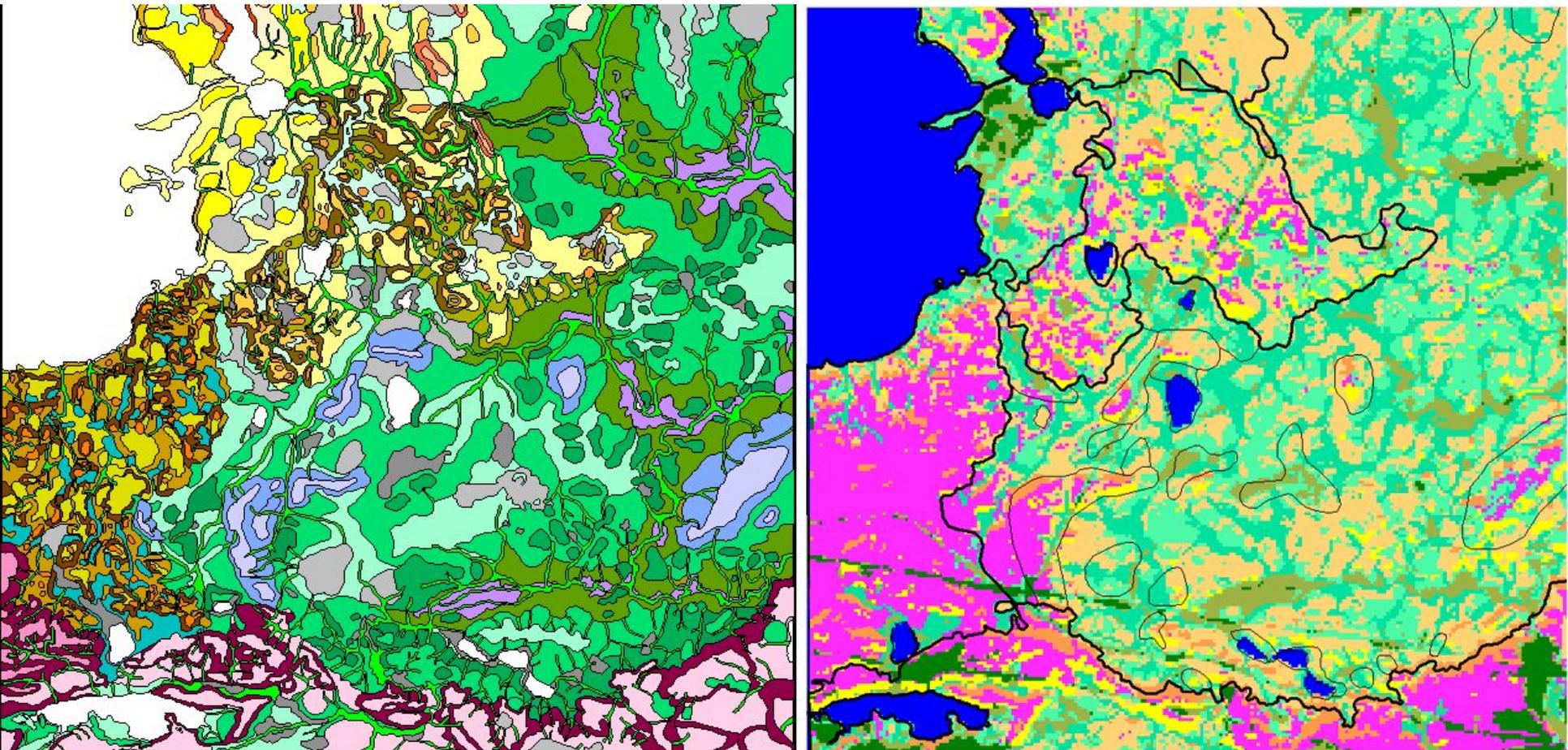


-  моренные гряды и камовые холмы с суглинистыми дерново-подзолистыми почвами под разнотравно-кисличными ельниками
-  вершины камовых холмов и дюнных гряд с песчаными дерново-подзолами под сосняками зеленомошными, беломошными и разнотравными
-  подножья холмов и плоские вогнутые ложбины с дерново-глеевыми и дерново-подзолистыми контактно отбеленными почвами под смешанными лесами
-  речные и озерные террасы с дерново- и торфяно-глеевыми почвами под ельниками и смешанными лесами
-  дюнные гряды и песчаные холмы с дерново-подзолистыми почвами под сосняками
-  плоские и выпуклые верховые болота с мощными торфами с редкостойными сосняками сфагновыми
-  речные поймы с дерново-глеевыми почвами под заливными лугами
-  крутые склоны холмов и гряд разного генезиса с дерновыми почвами под хвойными лесами
-  антропогенно измененные и антропогенные ландшафты (дороги, просеки ЛЭП, карьеры, сельхозугодья, лесопитомники и селитебные)

## Ландшафтная карта исследованной части национального парка «Валдайский».

Слева карта (урочища, местности и ландшафты), составленная классическим методом по полевым данным и материалам ДДЗ [Сысуев, Солнцев, 2006].

Справа карта, полученная методом К-средних для 8 кластеров по нормированным параметрам (6 каналов+NDVI, ETM/Landsat-7 и 4 параметров ЦМР – Z1, SCALg, RadB, Z2), с наложенными границами местностей и ландшафтов взятых с ландшафтной карты (слева)



## 4. ФУНКЦИОНАЛЬНО-ДИНАМИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ГЕОСИСТЕМ

**Функциональный подход** - выявление механизмов современных взаимодействий, объединяющих природные объекты в функционирующие как единое целое геосистемы.

**Потоки вещества и энергии** высокой интенсивности обладают способностью формировать специфический рельеф (флювиальный, гляциальный, эоловый и т.д.), а также прямо или косвенно обуславливать распределение и численность растений и животных, особенности почвенного покрова, воздействовать на другие потоки. Таким образом, они образуют сферу влияния, которая и есть **геосистема**. В бореальных условиях главным структурообразующим потоком является водный сток.

**Следовательно:**

геосистемы различных порядков могут быть выделены в соответствии со схемой Стралера-Философова на множестве элементов рельефа по значениям морфометрических величин, описывающих распределения воды в поле гравитации:

**водоразделы** любого порядка одновременно соответствуют локальным: максимумам высоты  $h$ , минимумам величины удельной площади водосбора (SCA), а также локальным максимумам  $kh$  (положительная величина);

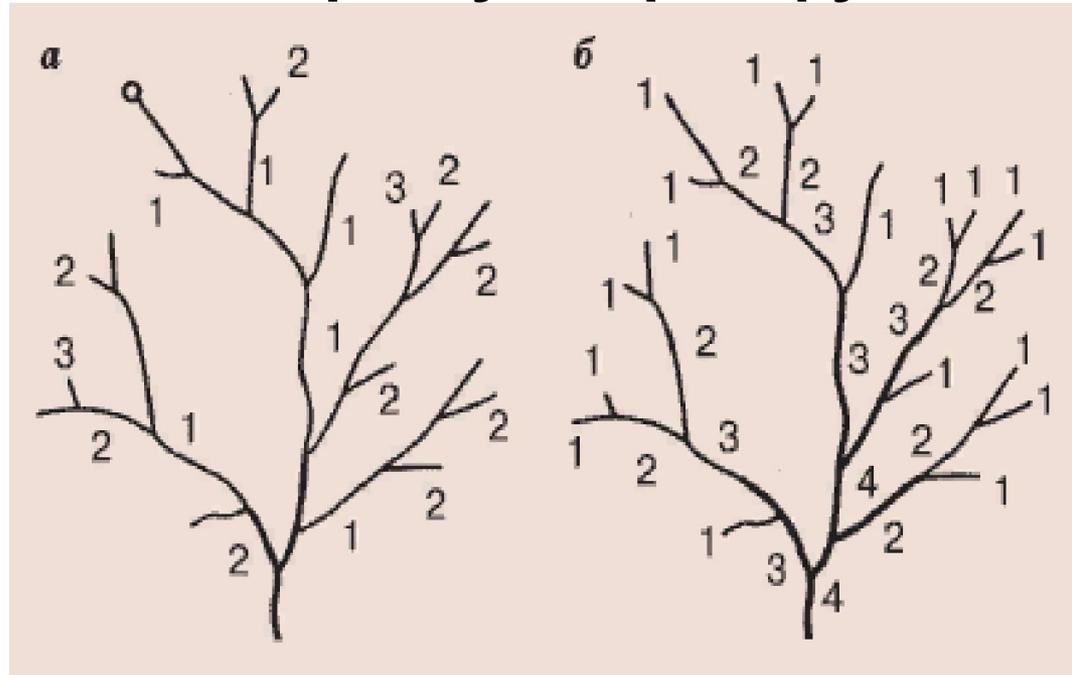
**тальвеги** соответствуют локальным: минимумам высоты  $h$ , локальным максимумам SCA, а также локальным минимумам  $kh$  (отрицательная величина).

# Порядок водотоков по Хортону - Стралеру

Согласно Роберту Хортону, водотоки без притоков называются водотоками первого порядка.

При слиянии водотоков равного порядка под равным углом порядок увеличивается на один.

При впадении водотока меньшей длины порядок исходного водотока не меняется



Существует геометрическая связь между количеством потоков данного порядка  $N_\omega$  и соответствующим порядком  $\omega$ . Параметром этого геометрического отношения является коэффициент бифуркации,  $R_b$

$$N_\omega = R_B^{\Omega - \omega}$$

# Законы Хортонa

Закон продольных длин Хортонa утверждает, что существует геометрическая зависимость между средней длиной потоков данного порядка и соответствующим порядком  $w$ . Параметром этого отношения является так называемый коэффициент длины,  $R_L$

$$\bar{L}_w = \bar{L}_1 R_L^{w-1}$$

Закон Хортонa о бассейнах утверждает, что существует геометрическая связь между средней площадью бассейнов, выведенных потоками данного порядка и соответствующим порядком  $w$ . Параметром этого отношения является так называемый коэффициент площади,  $R_A$

$$\bar{A}_w = \bar{A}_1 R_A^{w-1}$$

Order, $w$	Number of Streams	Average Length (km)	Average Area (km <sup>2</sup> )
1	60	2	5
2	13	5	12
3	9	13	40
4	4	20	110
5	1	55	330

Общая длина потоков – 437 км  
Плотность стока – (437 km)/(330 km<sup>2</sup>) = 1.3242 km<sup>-1</sup>  
Средняя длина поверхностного стока – 377.74 м

# Закон Токунага

Модель Токунаги рассчитывает количество боковых притоков на реке одного порядка

$T_\omega$  - среднее число водотоков одного порядка

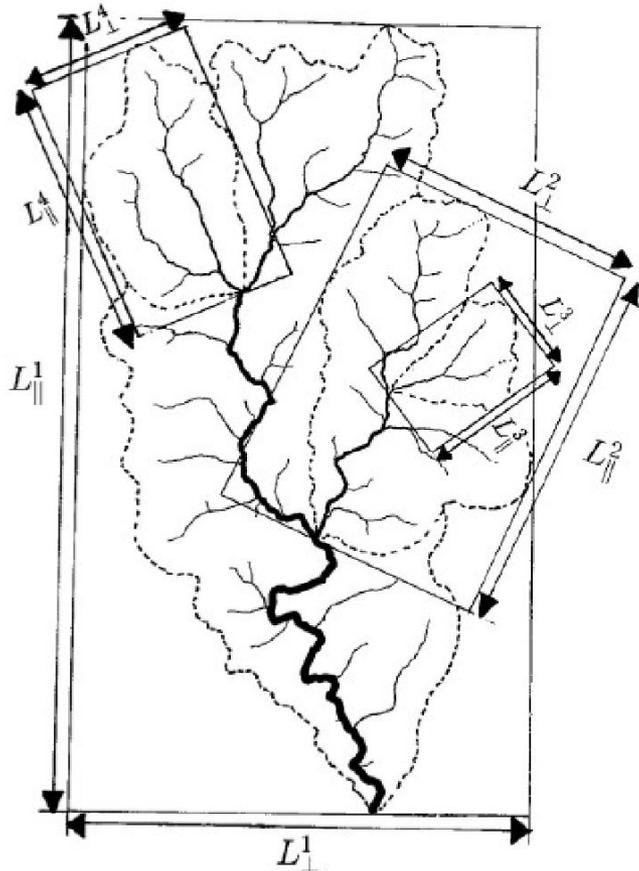
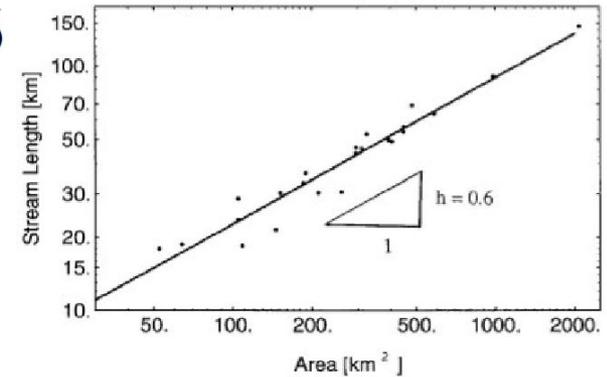
$$T_{\omega, \omega-k} = T_k \quad T_k / T_{k-1} = c \quad T_k = ac^{k-1}$$
$$T_1 = a$$

# Закон Хэка

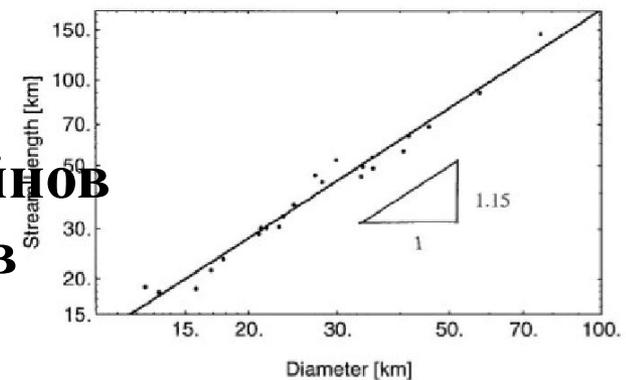
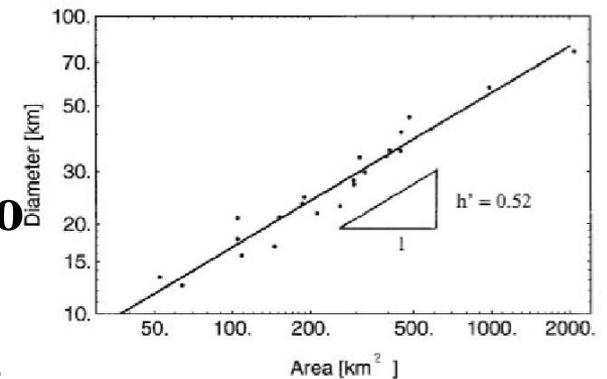
Отношение длины основного водотока и его бассейна может быть выражено соотношением

$$L = 1.4A^{0.6}$$

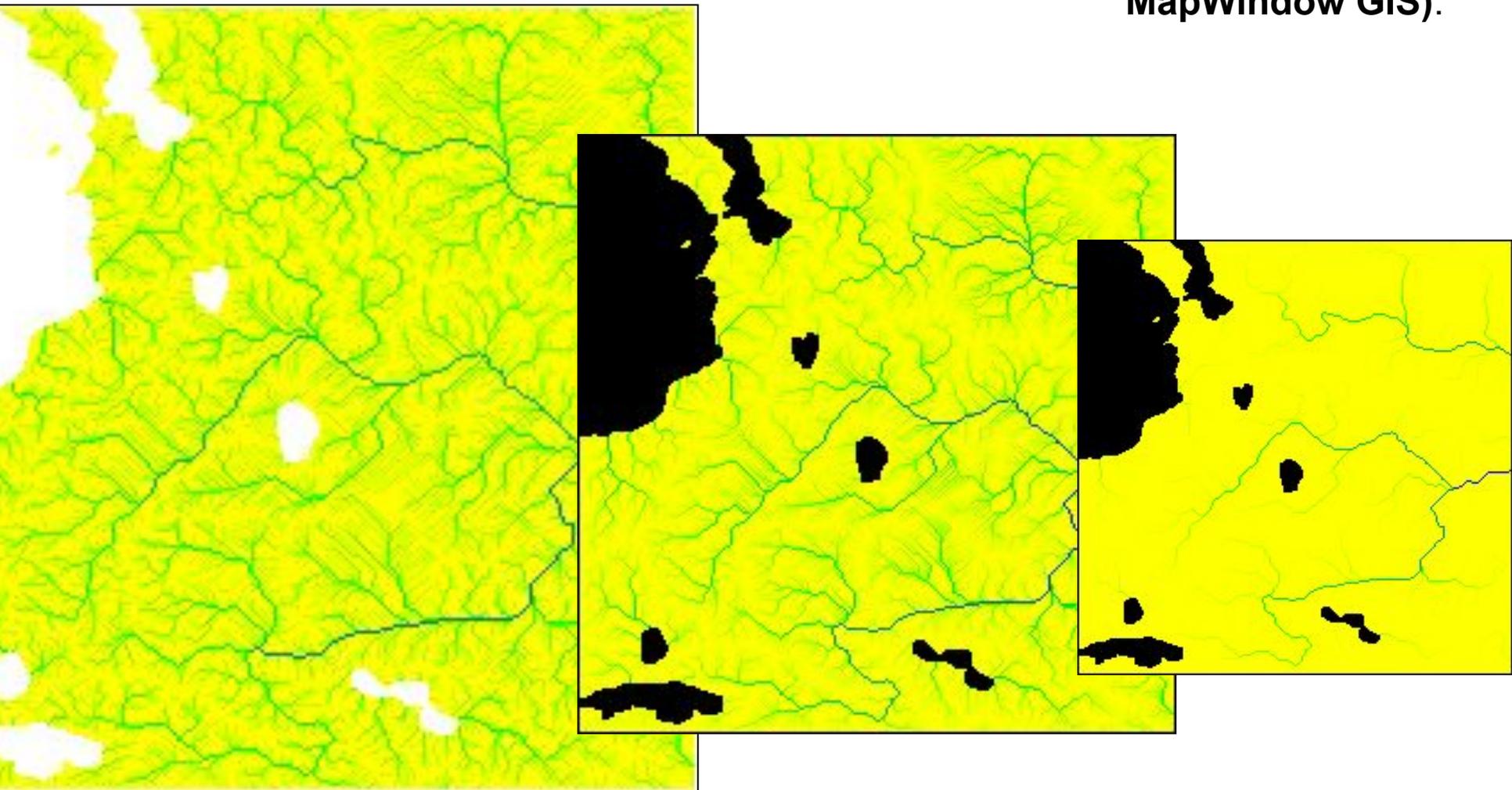
$$L \propto A^{0.568}$$



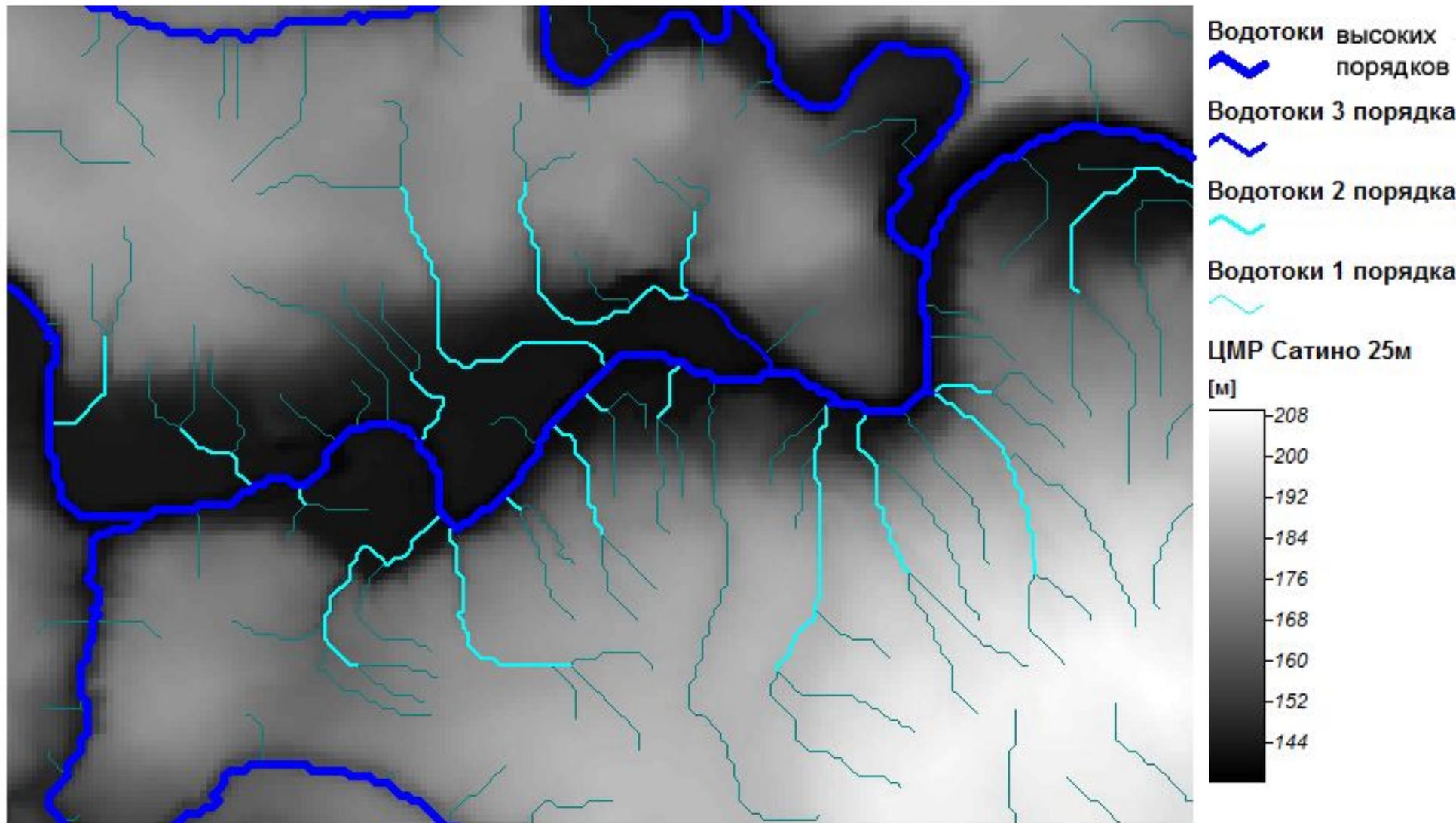
**Самоподобие  
бассейнов разного  
порядка,  
выражающееся в  
одинаковом  
соотношении  
площадей бассейнов  
разных порядков**



**Автоматизированная процедура выделения водотоков  
длиннее заданной критической величины (блок TauDem в  
MapWindow GIS).**

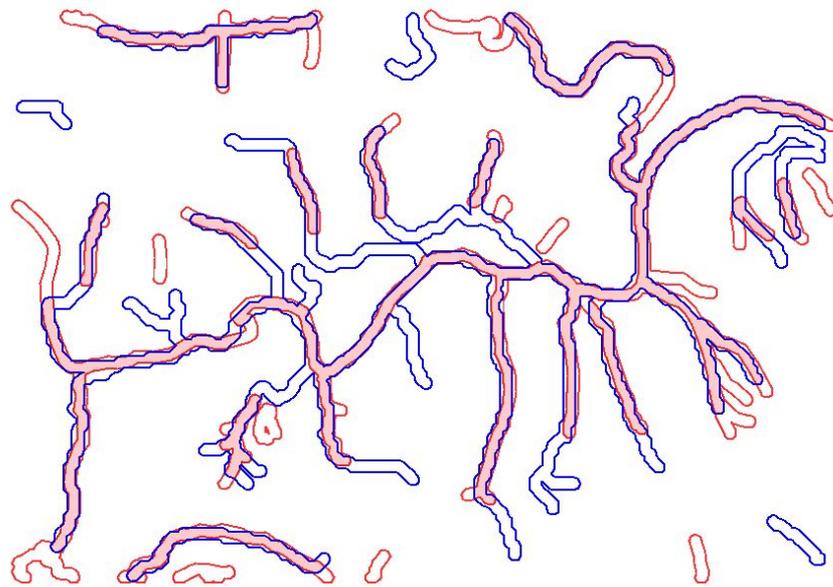


# Структура водотоков УНС Сатино, рассчитанная по морфометрическим параметрам ( ГИС SAGA )



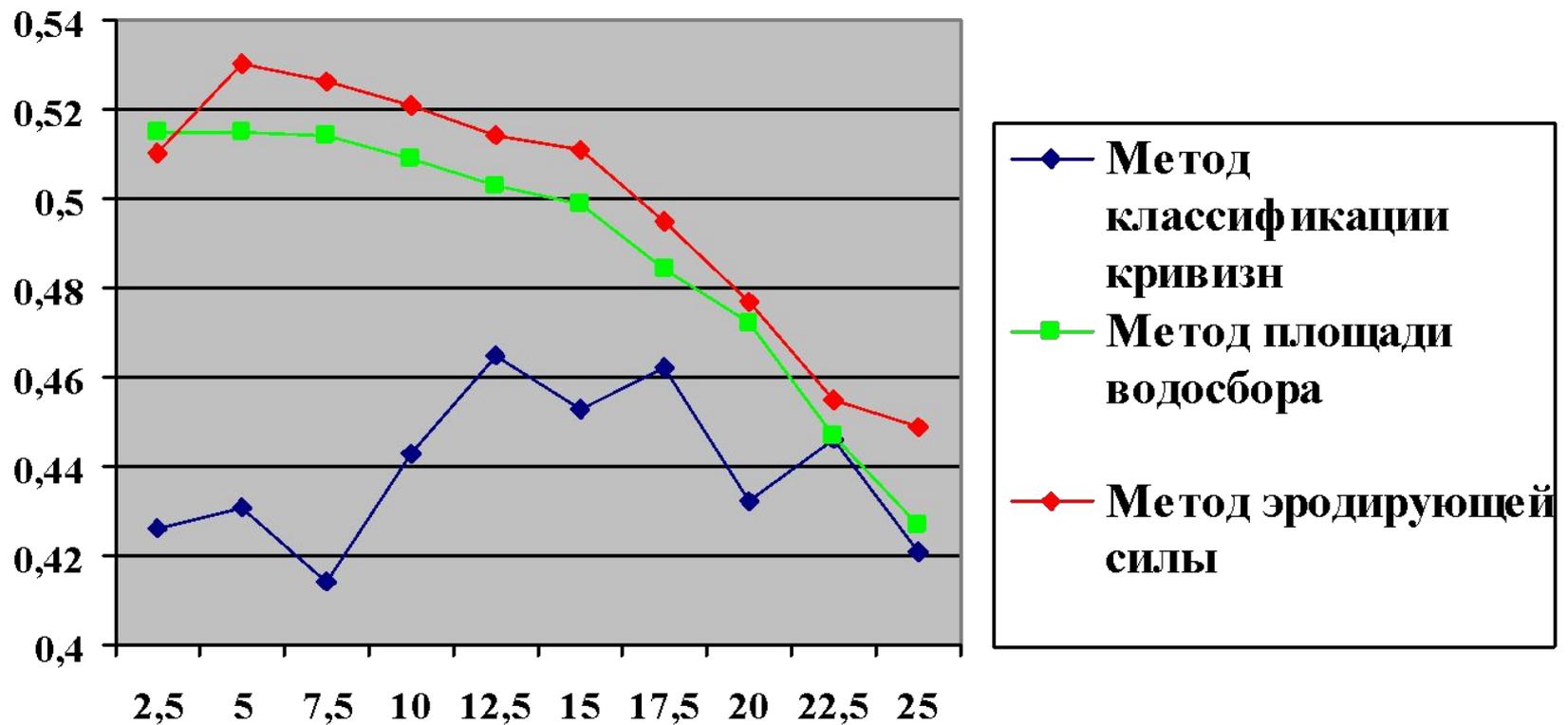
# Критерии точности моделирования

Ошибки и доля верно отображённых каналов учитываются интегральным критерием  $F$ , равным отношению площади окрестностей выделенных моделью реальных водотоков ( $S$ ) и совокупной площади окрестностей реальных ( $S_R$ ) и модельных ( $S_M$ ) водотоков:

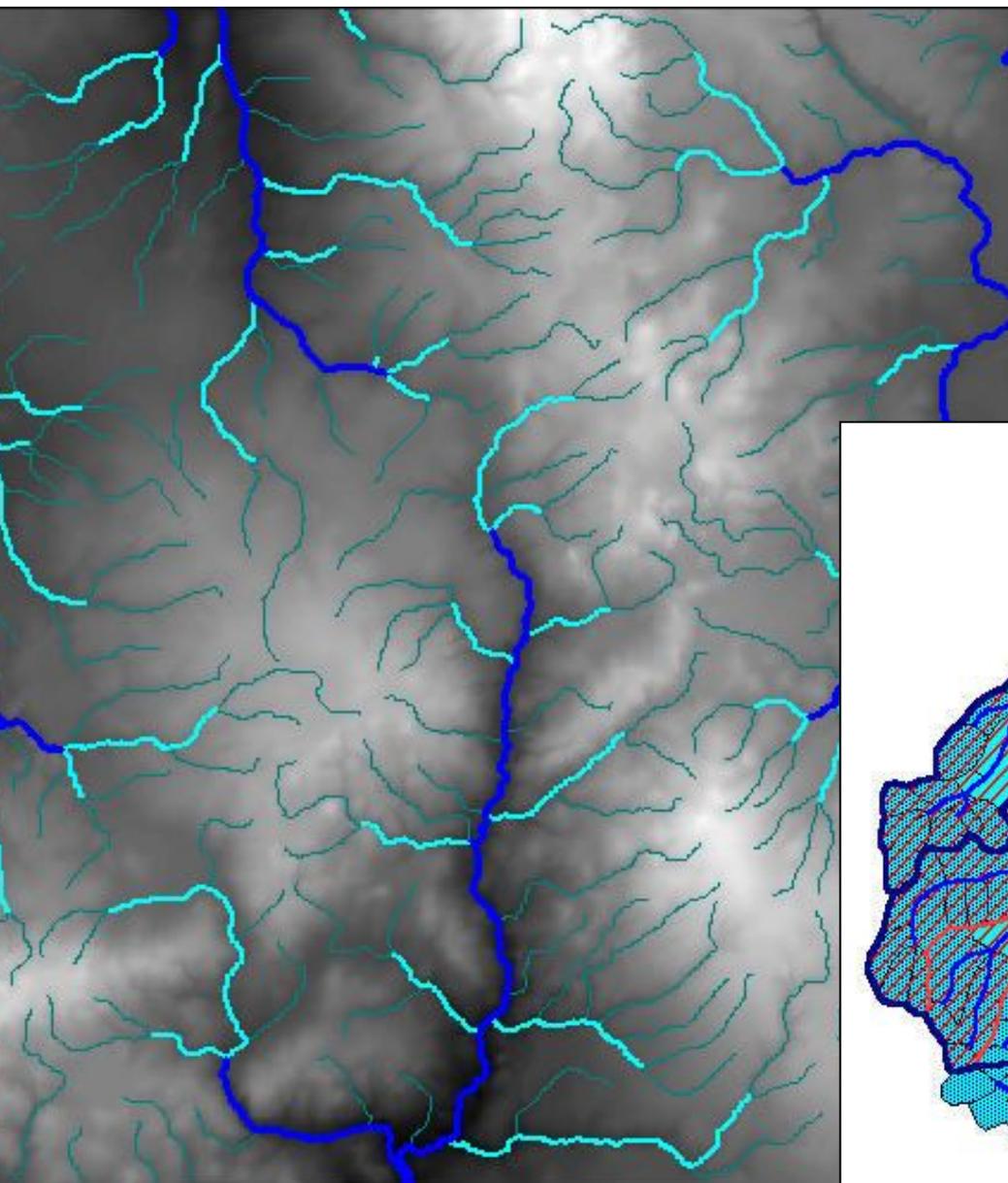


$$F = S / (S_R + S_M - S)$$

# Значения критерия точности F моделей дренажных сетей, построенных методами классификации кривизн, площади водосбора и эродирующей силы для ЦМР с различной величиной пикселя

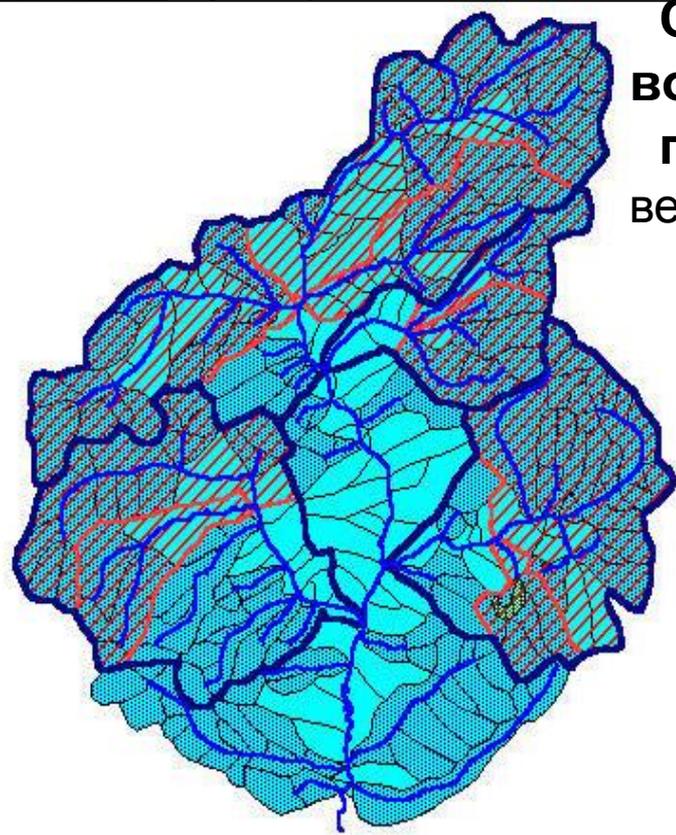


# Структура водотоков ЦЛГБПЗ. Расчет по ЦМР, критический параметр удельная площадь водосбора ( SCA - specific catchment's area)



- SCA Водотоки 4 порядка
- SCA Водотоки 3 порядка
- SCA Водотоки 2 порядка
- SCA Водотоки 1 порядка
- ЦМР 28,5м

## Структура водосборных геосистем верхний р. Межа



- Гидросеть
  - Реки и ручьи
  - Болото
- Геосистемы
  - 4 порядка
  - 3 порядка
  - 2 порядка
  - 1 порядка

## Связь параметров гидрологического функционирования со структурой геосистем ЦЛГБПЗ

Порядок водосбора	Количество геосистем	Средняя площадь, км <sup>2</sup>	Ср. расход, июнь, л/с	Модуль стока, июнь, л/сек·км <sup>2</sup>
1	393	0.093	0,2	2
2	52	0.478	6	12
3	9	2.391	25	10
4	4	6.743	60	9
5	1	36.645	120	3

Зависимость средней площади водосбора (Y) от его порядка (X) имеет вид

$$Y=b_0*X^{b_1};$$

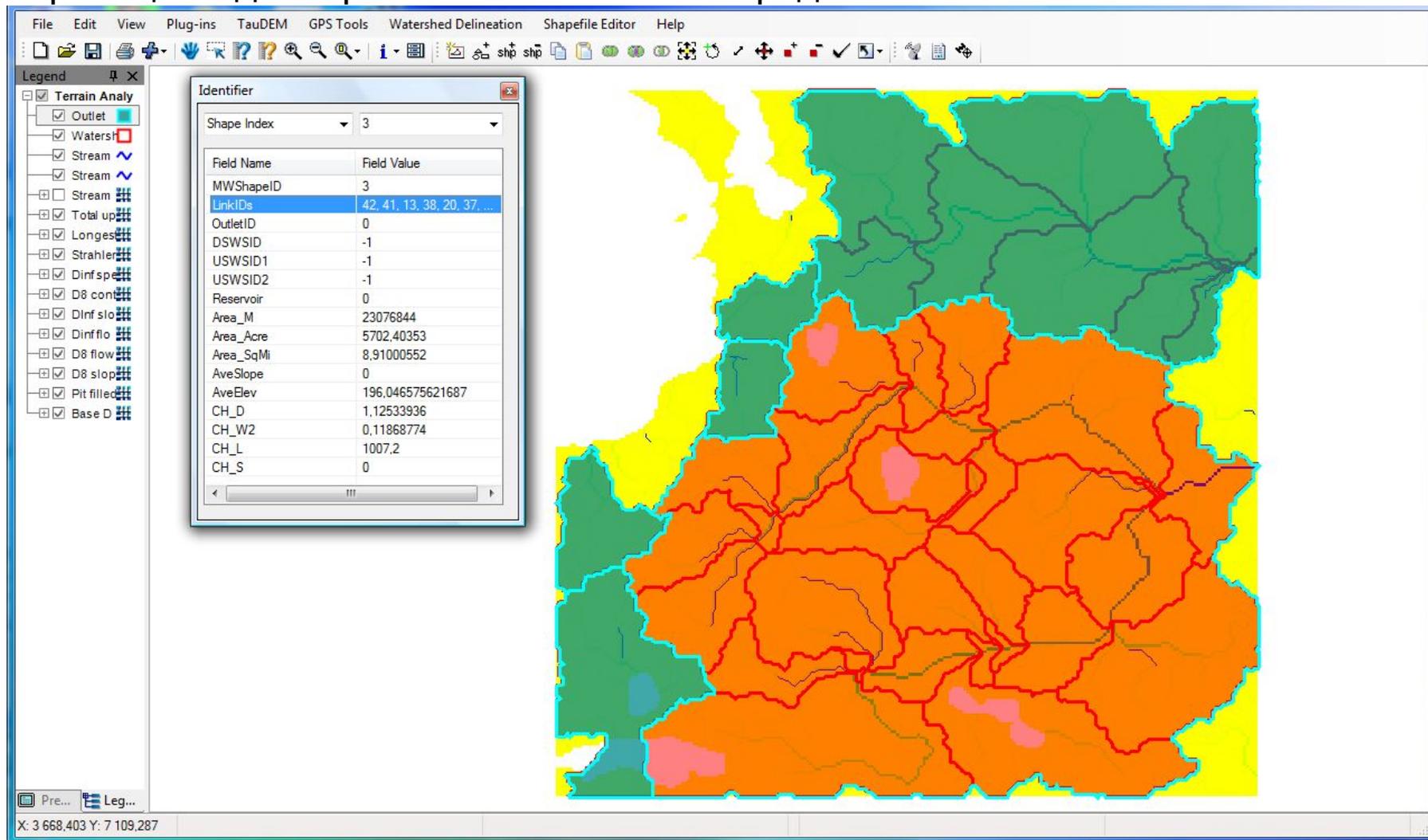
значения параметров:  $b_0=0.42$ ,  $b_1=2.52$ ; достоверность модели  $R^2=0.99977$ .

# Выделение бассейнов по удельной площади водосборов

(блок TauDEM в MapWindow GIS).

1 - лесные заболоченные водосборы р Лонинка и Чернушка. При их слиянии водосборная геосистема приобретает 3-ий порядок и целиком находится в пределах ландшафта озерно-водно-ледниковой равнины с грядами.

2 - границы водосборных геосистем 1-го порядка.



## 5. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ МЕТОД ВЫЧИСЛЕНИЯ РАСХОДОВ

применяется, если нет возможности измерить скорости течения, реализован в ряде ГИС с функциями расчета параметров водосборов, в частности в ГИС SAGA

$$Q = \omega c \sqrt{Ri}$$

Формула Шези-Маннинга

**Q** – расход, м<sup>3</sup>/с;

**ω** - площадь живого сечения, м<sup>2</sup>;

**R** – гидравлический радиус, м, **R=ω/χ**;

**χ** - смоченный периметр, м;

**c** – коэффициент Шези;

$$c = \frac{1}{n} R^{1/6}$$

**n** – коэффициент шероховатости русла (принимается по справочникам в зависимости от состояния русла);

**i** – уклон свободной поверхности (для большинства равнинных рек 0,001...0,005)

# Распределение гидрофизических параметров на основе структуры ландшафтов бассейна р. Лонинка

для моделирования гидрологических процессов в ГИС SAGA.

**А** - Manning's n

**В** - Curve number,

**А**

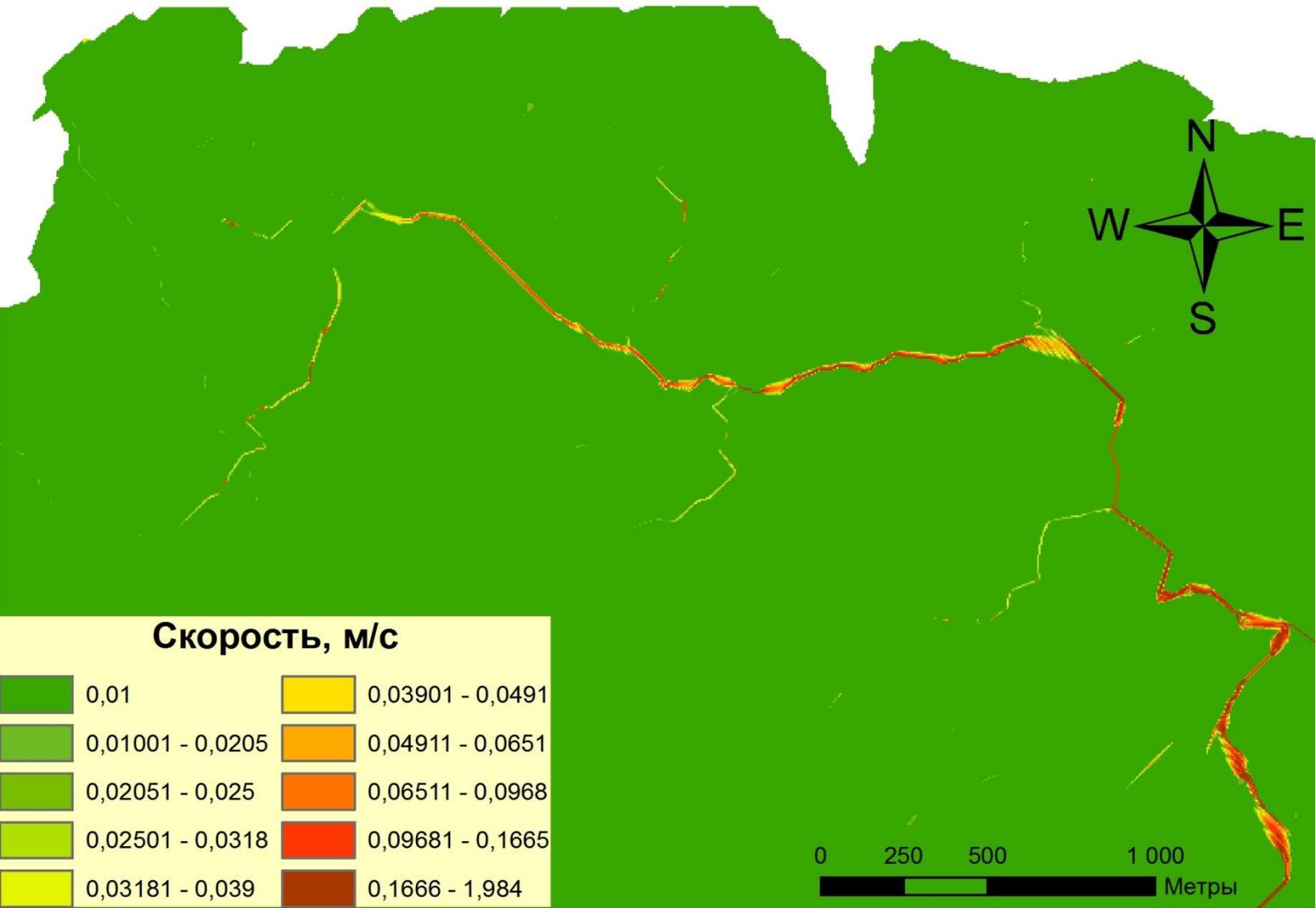


**В**



# Скорость стока поверхностных вод в бассейне р. Лонинка

Расчеты в ГИС SAGA, интенсивность осадков 10 мм/час,  
CSS=1, MFT=180, CDT=360



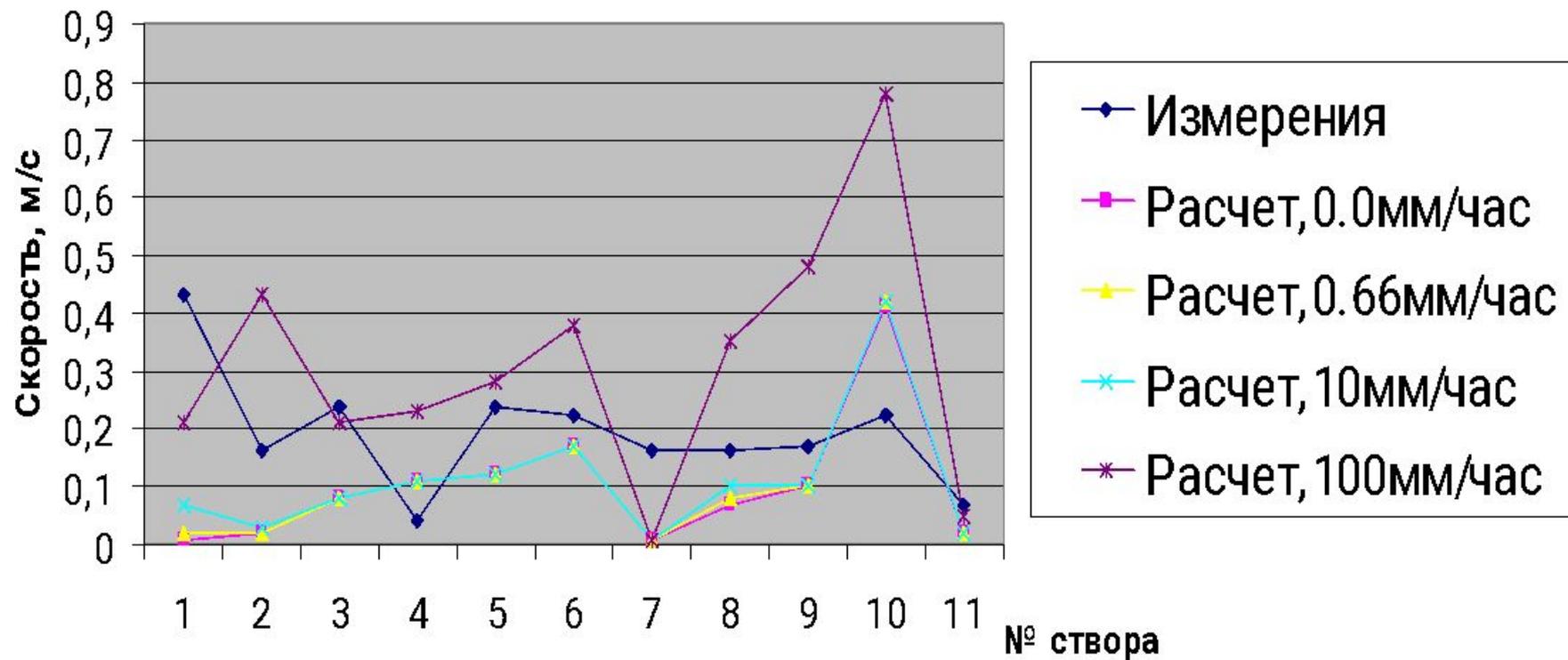
Долина р. Лонинка в нижнем (слева) и в верхнем течении



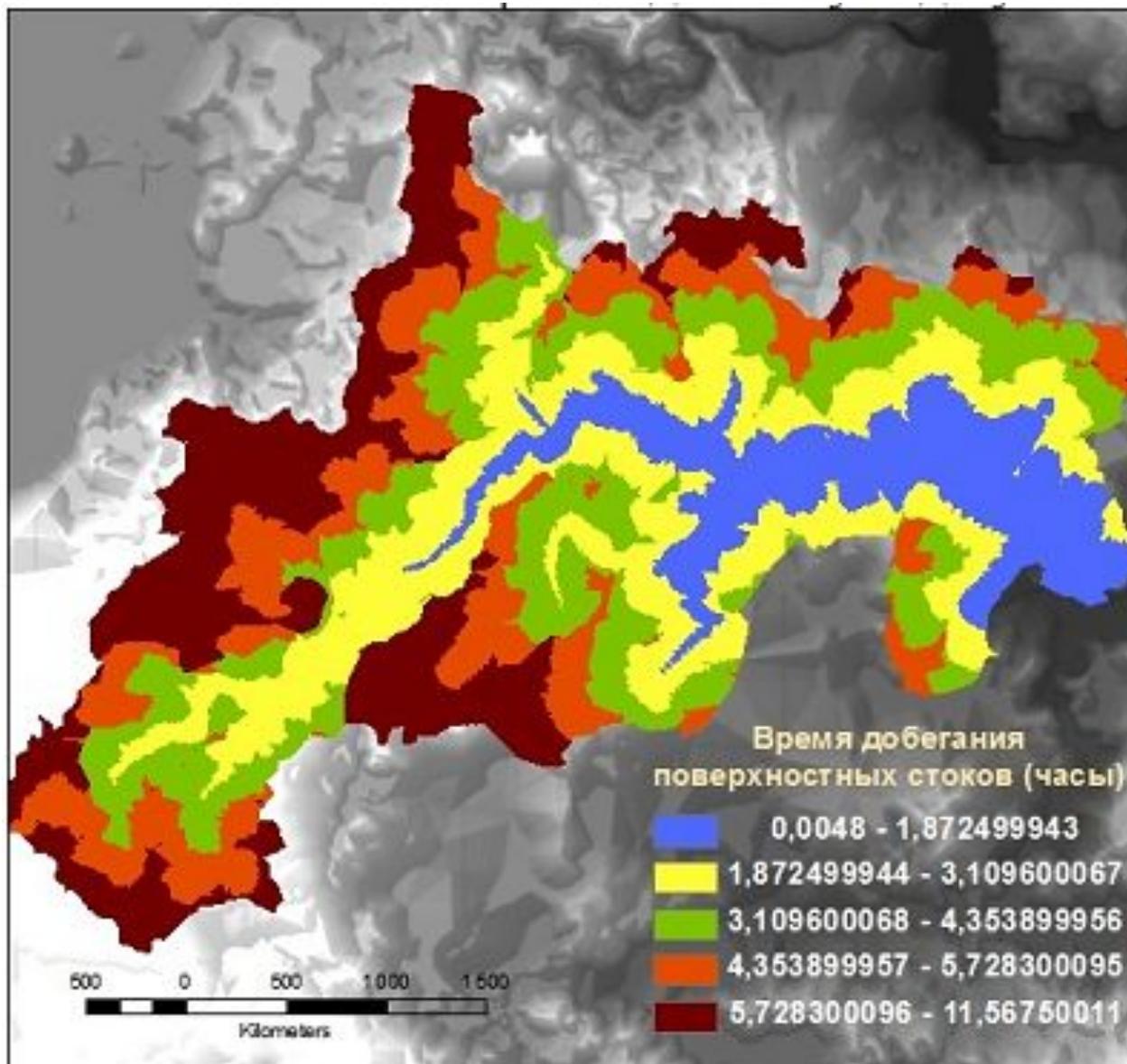
**Сравнение рассчитанных в ГИС SAGA и измеренных скоростей стока в характерных створах р. Лонинка (параметры расчета CSS=1; MFT=180; CDT=360, интенсивность осадков 0.0, 0.66, 10.0, 100.0 мм/час)**

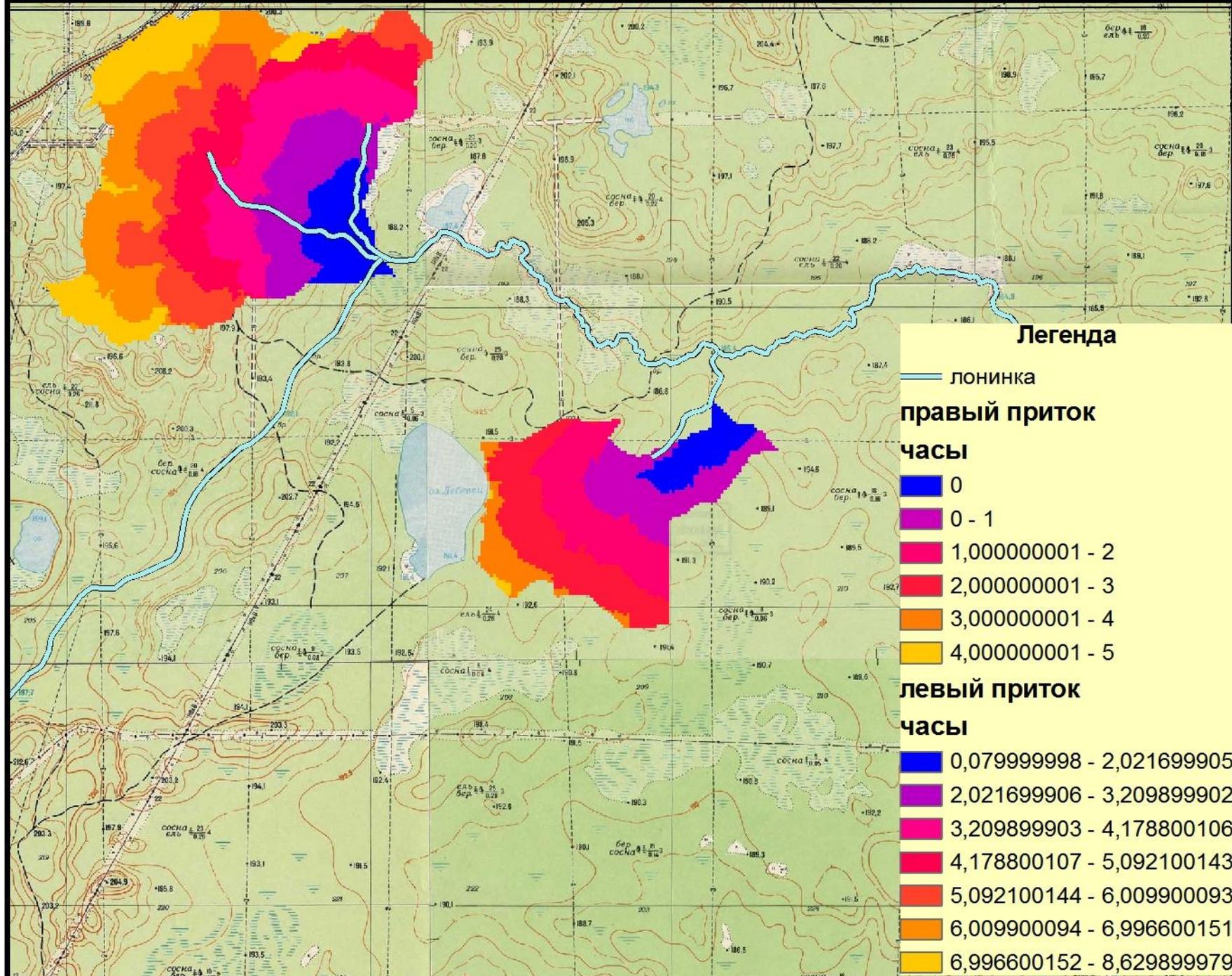
№ створа	S, м <sup>2</sup>	Рассчитанные				Измеренные			
		Скорость, м/с				Скорость, м/с		Расходы (л/с)	
		0.0	0.66	10.0	100.0	июнь	сентябрь	июнь	сентябрь
1.	<b>0.048</b>	<b>0,01</b>	<b>0,02</b>	<b>0,07</b>	<b>0,21</b>	<b>0.13</b>		<b>8,46</b>	
2.	<b>0.074</b> 0.074	<b>0,02</b>	<b>0,02</b>	<b>0,03</b>	<b>0,43</b>	<b>0.20</b>	<b>0.16</b>	<b>10,06</b>	<b>11,62</b>
3.	<b>0.074</b> 0.083	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,21</b>	<b>0.24</b>	<b>0.21</b>	<b>18,34</b>	<b>17,39</b>
4.	<b>0.068</b> 0.098	<b>0,11</b>	<b>0,11</b>	<b>0,11</b>	<b>0,23</b>	<b>0.04</b>	<b>0.23</b>	<b>29,05</b>	<b>22,24</b>
5.	<b>0.338</b> 0.205	<b>0,12</b>	<b>0,12</b>	<b>0,12</b>	<b>0,28</b>	<b>0.24</b>	<b>0.19</b>	<b>80,22</b>	<b>37,78</b>
6.	<b>0.182</b> 0.290	<b>0,17</b>	<b>0,17</b>	<b>0,17</b>	<b>0,38</b>	<b>0.22</b>	<b>0.09</b>	<b>39,15</b>	<b>25,47</b>
7.	<b>0.401</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0.16</b>		<b>64,69</b>	
8.	<b>1.024</b>	<b>0,07</b>	<b>0,08</b>	<b>0,10</b>	<b>0,35</b>	<b>0.16</b>		<b>168,24</b>	
9.	<b>1.04</b>	<b>0,10</b>	<b>0,10</b>	<b>0,10</b>	<b>0,48</b>	<b>0.17</b>		<b>175,42</b>	
10.	<b>0.397</b>	<b>0,41</b>	<b>0,42</b>	<b>0,42</b>	<b>0,78</b>		<b>0.22</b>		<b>87,36</b>
11.	<b>0.207</b> 0.074	<b>0,02</b>	<b>0,02</b>	<b>0,02</b>	<b>0,05</b>	<b>0.07</b>	<b>0.04</b>	<b>14.85</b>	<b>2.65</b>

# Сравнение расчетных и измеренных скоростей течения р. Лонинка в характерных створах



# Время добегания поверхностного стока до замыкающего створа р. Лонинка (при интенсивности осадков 100 мм/час и значении "Manning's n" (0,43) и "Curve Number" (67))





### Легенда

- лонинка
- правый приток
- часы**
- 0
- 0 - 1
- 1,00000001 - 2
- 2,00000001 - 3
- 3,00000001 - 4
- 4,00000001 - 5
- левый приток**
- часы**
- 0,079999998 - 2,021699905
- 2,021699906 - 3,209899902
- 3,209899903 - 4,178800106
- 4,178800107 - 5,092100143
- 5,092100144 - 6,009900093
- 6,009900094 - 6,996600151
- 6,996600152 - 8,629899979

Структура водотоков ЦЛГБПЗ, рассчитанная по морфометрическим параметрам

