

ЭКСПЕРТНАЯ ОЦЕНКА ДЕГРАДАЦИИ СТЕПНЫХ ПОЧВ

Пузаченко Ю.Г.

Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН

Деградация почв представляет собой совокупность процессов, приводящих к изменению функций почвы как элемента природной среды, количественному и качественному ухудшению ее свойств и режимов, снижению природно-хозяйственной значимости земель. ("МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫЯВЛЕНИЮ ДЕГРАДИРОВАННЫХ И ЗАГРЯЗНЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ" от 27 марта 1995 г. N 315/582).

В расширенном варианте:

«Among the land used for agriculture and forestry, soil is an important component. The intense and increased pressure on land leads to its degradation and pollution, which may result in a partial or complete loss of its productive capacity. Soil degradation can be described as a process by which one or more of the potential ecological functions of the soil are harmed. These functions relate to bio-mass production (nutrient, air and water supply, root support for plants) to filtering, buffering, storage and transformation (e.g., water, nutrients, pollutants), and to biological habitat and gene reserve. Soil degradation is defined as a process that lowers the current and/or future capacity of the soil to produce goods and services. Two categories of a soil degradation process are recognised, viz., displacement of soil material (e.g., soil erosion by water forces or by wind forces) and *in situ* soil deterioration covering chemical or physical soil degradation. Classifications of soil degradation types, subtypes and symbols for use are given below. The relevant definitions are given in FAO (1994) and (Adapted from FAO/RAPA, 1992).» The Committee on Statistics of the United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific (ESCAP) <http://www.unescap.org/stat/envstat/envstat.asp>

В соответствии с проектом Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) <http://www.iwr.msu.edu/rusle/about.htm> деградация, оцениваемая через вынос вещества символически записывается как функция

$$A = R * K * LS * C * P$$

Where

A = estimated average soil loss in tons per acre per year
от факторов

R = rainfall-runoff erosivity factor

K = soil erodibility factor

L = slope length factor

S = slope steepness factor

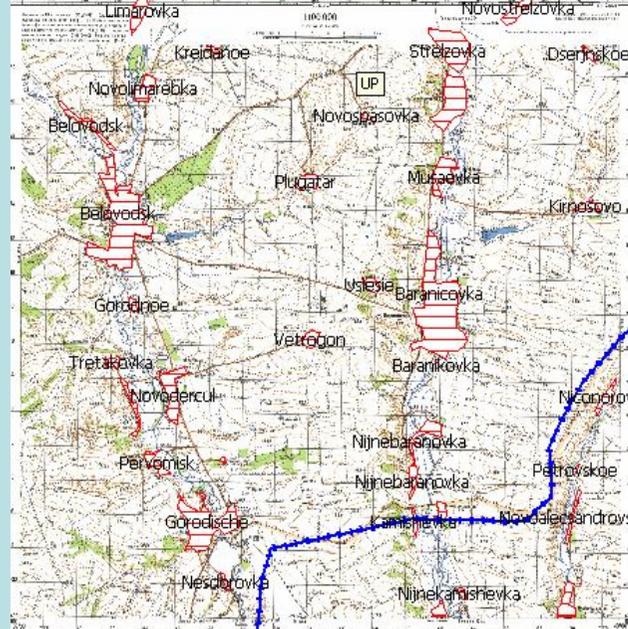
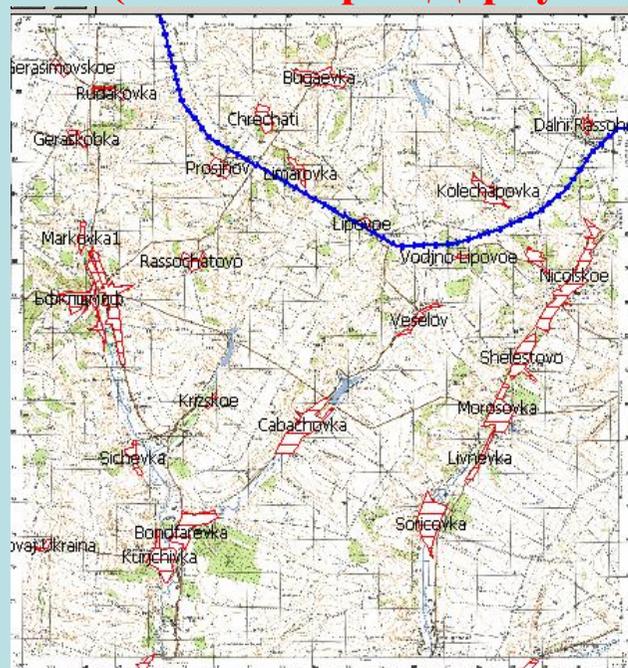
C = cover-management factor

P = support practice factor

Another factor for soils is called "T value" which stands for "Tolerable Soil Loss." It is not directly used in RUSLE equation, but is often used along with RUSLE for conservation planning. Soil loss tolerance (T) is the maximum amount of soil loss in tons per acre per year, that can be tolerated and still permit a high level of crop productivity to be sustained economically and indefinitely.

Попытки оценить состояние почвы - основы основ существования человечества - предпринимаются последние три десятилетия в рамках программы, которая называется "Глобальные Оценки Деградации Почв". Эти оценки базируются на экспертных заключениях специалистов. В 2008 году Программа сообщила, что в процессе деградации находится 15% почв. Новое исследование на эту тему опубликовано неправительственным фондом ISRIC - World Soil Information и дало намного более негативные результаты. Основой этого метода оценки стал анализ спутниковых фотографий поверхности земли за период с 1981 по 2003 год. Как оказалось, в состоянии деградации ныне находятся 24% почв. Авторы исследования, которое опубликовано журналом Soil Use and Management, утверждают, что причиной этого

ЭКСПЕРТНАЯ ОЦЕНКА ЭРОДИРОВАННОСТИ ПОЧВ (бассейны рек Деркул и Камышная)



ЦЕЛЬ:

Разработать, используя дистанционную информацию (Landsat) и трехмерную модель рельефа, основу экспертной оценки эродированности черноземов и изменения стока углерода при изменении формы ведения хозяйства

Используется идеология проекта The Revised Universal Soil Loss Equation Version 2 (RUSLE2):

Эродлируемость почв в пределах одного климатического региона есть функция рельефа, растительности и формы хозяйственного использования земель.

- Задача: 1. Представить рельеф через свойства определяющие эродлируемость**
- 2. Выделить типы форм с различной потенциальной эродлируемостью**

процесса является неразумное использование сельскохозяйственных земель и различные природные процессы. Основой оценки деградации по программе GLADA являются значения индекса NDVI, отражающего биологическую продуктивность и биомассу с локализацией более детальных оценок на основе Landsat. Реализация подхода была осуществлена для разных тестовых регионов, в которых корреляторы указывали территории, где равновесие между климатом и естественным сопротивлением ландшафта было нарушено человеческим вмешательством, приводящим к уменьшенной текущему и/или будущему плодородию почвы. При этом оценки деградации соответствовали интервалу .5-10 лет. (Oldeman, R.T.A. Hakkeling, W.G. Sombroek World map of the status of human-induced soil degradation: an explanatory note / L.R. Global Assessment of Soil Degradation GLASOD October 1990 - first edition, October 1991 - second revised edition).

В "МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫЯВЛЕНИЮ ДЕГРАДИРОВАННЫХ И ЗАГРЯЗНЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ" от 27 марта 1995 г. N 315/582 приводятся полный перечень критериев, на основе которых оценивается деградация почв в общем подобные критериям проекта RUSLE и технология картографирования деградации. Набор критериев весьма велик и полная оценка состояния почв может быть осуществлена только на основе полевых измерений. Эродированность почв является лишь одной формой деградации, определяемой плоскостным смывом и эрозией. R. Zurayk A GIS-based Methodology for Soil Degradation Evaluation. Stott D.E., Mohtor R.H. and Steinhartdt (eds.) Sustaining the Global Farm, 2001. Selected papers from the 10th International Soil Conservation. Organization Meeting held May 24-29, 1999 at Purdue University развил технологию оценки, опирающуюся на карту ландшафтного покрова, построенную на основе дистанционной информации, карты рельефа и эрозионной сети. Судя по всему, им были получены удовлетворительные результаты. В общем же из общих соображений, очевидно, что существует равновесное состояние между проявлением силы гравитации, определяемой крутизной и формой поверхности, почвообразующей породой, структурой почвы, развитием и состоянием растительности, суммой и интенсивностью выпадения осадков и хозяйственным воздействием при котором вынос-привнос вещества близок к нулю. Оценки допустимого выноса в условиях близких равновесия несколько различны и составляют от 0,5 до 2 тонн/га год. (А.М. Дербенцева, ЭРОЗИЯ И ОХРАНА ПОЧВ (МЕХАНИЧЕСКАЯ ДЕГРАДАЦИЯ ПОЧВ). Владивосток, 2006).

В предлагаемой работе рассматривается одна из возможных версий подхода, использующего представление о некотором равновесии с использованием информационных возможностей дистанционной информации и трехмерных моделей рельефа. Ранжированному отклонения от равновесия в сторону большого выноса можно поставить в соответствие определенный уровень деградации почвы.

Регион, материал и методика.

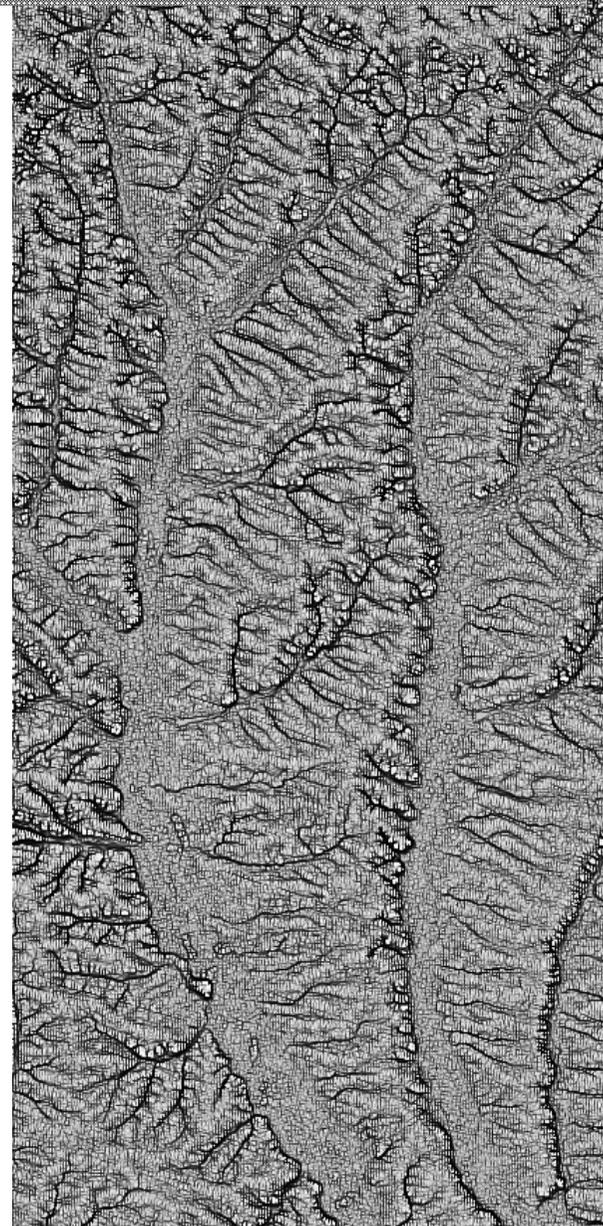
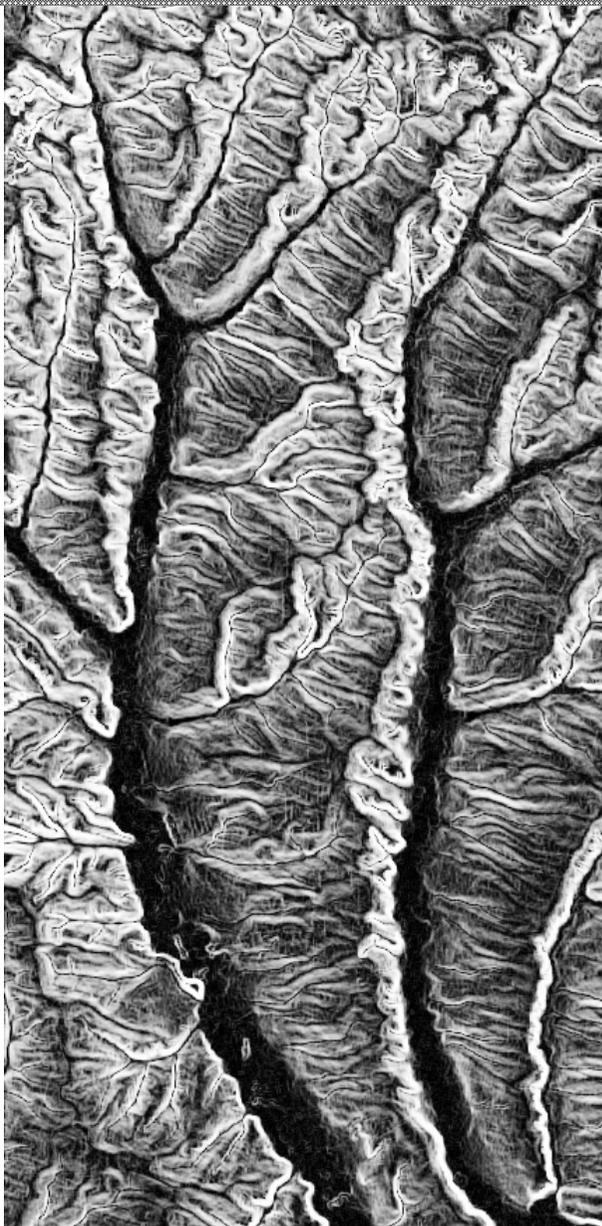
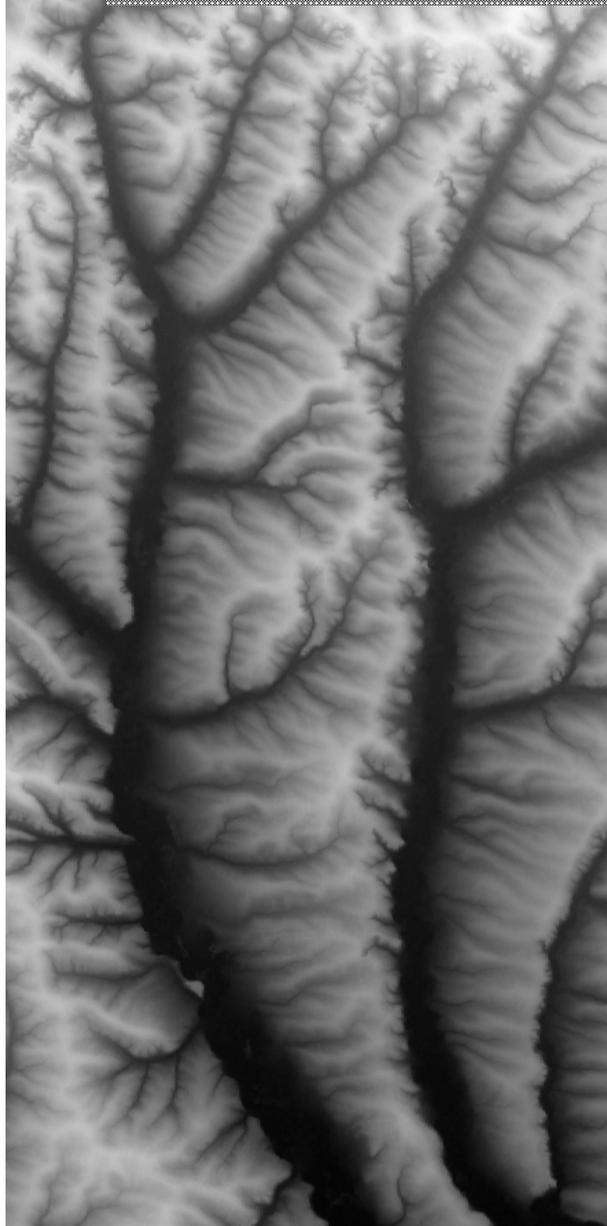
Регионом для которого осуществляется оценка является территория Беловодского и Марковского районов Луганской области республики Украины) бассейны рек Деркул и Камышенка. Общая площадь района 1482 кв. км , с координатами левый верхний угол 39° 30' СШ, 49°40' ВД и правый нижний угол 49°СШ и 40°ВД . Зональными для региона являются настоящие и реже выщелоченные черноземы с в основном степной растительностью, в большинстве своем замещенными пашнями.

По трехмерной модели рельефа построенной на основе радарной съемки (SRTM) с линейным разрешением 100 м на местности оценивается уклон поверхности, максимальная и минимальная кривизны, лапласиан, отражающий форму поверхности, освещенность с востока и с юга. В основном эрозия определяется уклоном, кривизной или формой поверхности и длиной склона. На склонах крутизной менее 1° эрозия, как правило,

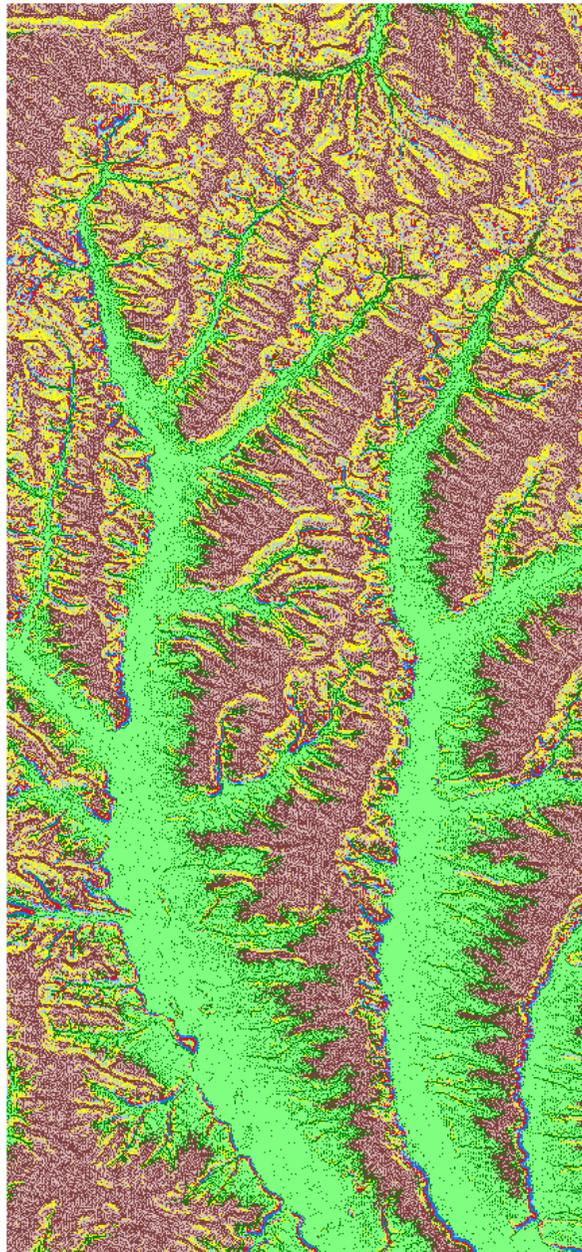
ВЫСОТА

КРУТИЗНА

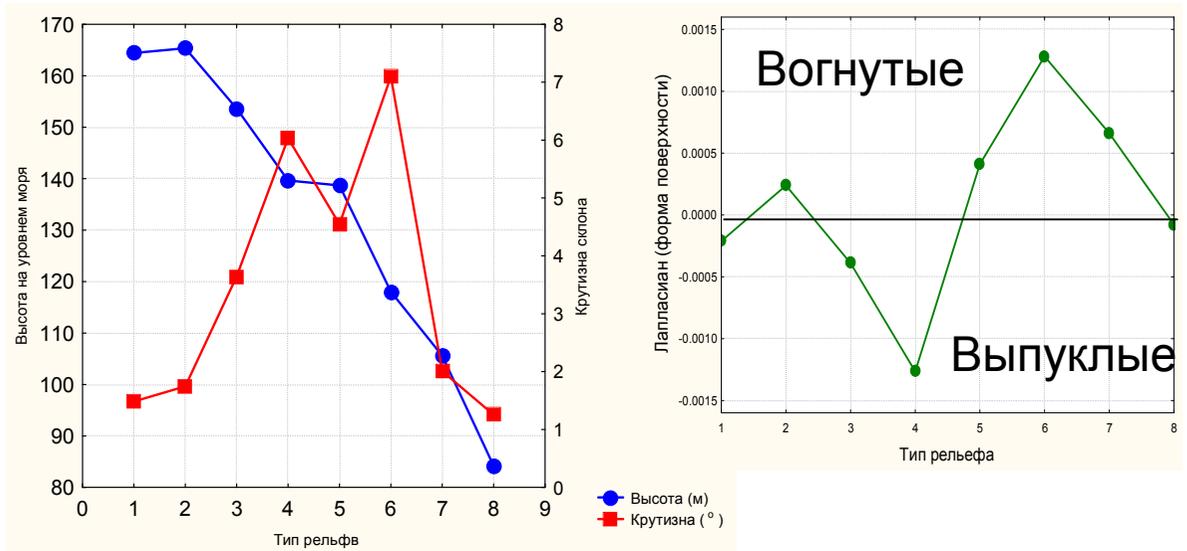
**МИНИМАЛЬНАЯ
КРИВИЗНА**



ФОРМЫ РЕЛЬЕФА (КЛАССИФИКАЦИЯ)



- | | |
|---|---|
| 1 | Слабо пологие |
| 2 | 1. слабовыпуклые возвышенные |
| 3 | 2. слабовогнутые возвышенные |
| 4 | 3. Слабо покатые выпуклые верхние части |
| 5 | 4. Сильно выпуклые крутые |
| 6 | 5. Слабовогнутые покатые |
| 7 | 6. Сильновогнутые крутые |
| 8 | 7. Вогнутые слабопологие при долинные |
| | 8. Пологие долины рек |



отсутствует. Смыв почвы начинается при крутизне склона выше 1,5-2⁰. На пологих склонах эрозия выражена слабо. Слабо покатые и покатые склоны с углами 2-5⁰ и 5-9⁰ уже опасны в эрозионном отношении. Эрозия усиливается на выпуклых поверхностях и ослабляется на вогнутых (Дербенцева, 2006). Длина склона в данном случае не рассматривается. На основе классификации по показателям высоты, уклона и формы поверхности строится карта типов рельефа в различной степени подверженных эрозии почв.

Измерения отраженной солнечной радиации в шести спектральных каналах спутником Landsat 7 (21 июля, 2002 г) с особым измерением теплового потока дает информацию о множестве вариантов преобразования солнечной энергии, определяемых физическими свойствами экосистем, включающими и степень эродированности поверхности. Содержательная информация содержится не только в самих значениях отраженной радиации в разных каналах, но и в разностях и отношениях их значений. В практике анализа дистанционной информации они называются индексами. Некоторые индексы, например, нормализованный дифференциальный индекс (NDVI) весьма инвариантно относительно времени и места съемки отражает биологическую продуктивность или фитомассу в данный момент времени. Физический смысл других часто определяется местом и временем. Однако в совокупности они содержат многомерную информацию, характеризующую состояние и функционирование экосистем. Традиционно к этому множеству переменных применяется факторный анализ снижающий размерность. Было показано (Пузаченко Ю.Г., Гагаева З.Ш., Алещенко Г.М. Построение мелкомасштабной карты ландшафтного покрова по трехканальному изображению Landsat 7 открытого доступа. Изв. Сер. Географ. 1. 2005. Кренке, Пузаченко, 2009), что получаемые факторы обычно отражают некоторый элементарный физический процесс, описывающий пространственное варьирование состояния экосистем. Если одним из таких процессов является, например, эродуемость почв, то равновесность текущего состояния относительно рельефа может быть установлена с помощью дискриминатного анализа. Все отклонения от равновесия в сторону деградации будут выделять эродированные почвы. Зная равновесную норму, для каждого случая можно количественно оценить степень эродированности. Если принять, что норме отвечает некоторое региональное значение запасов углерода, то можно определить его потери определяемые деградацией. Эти операции позволяют решить поставленные задачи и дать экспертную оценку эродированности почв.

Анализ рельефа.

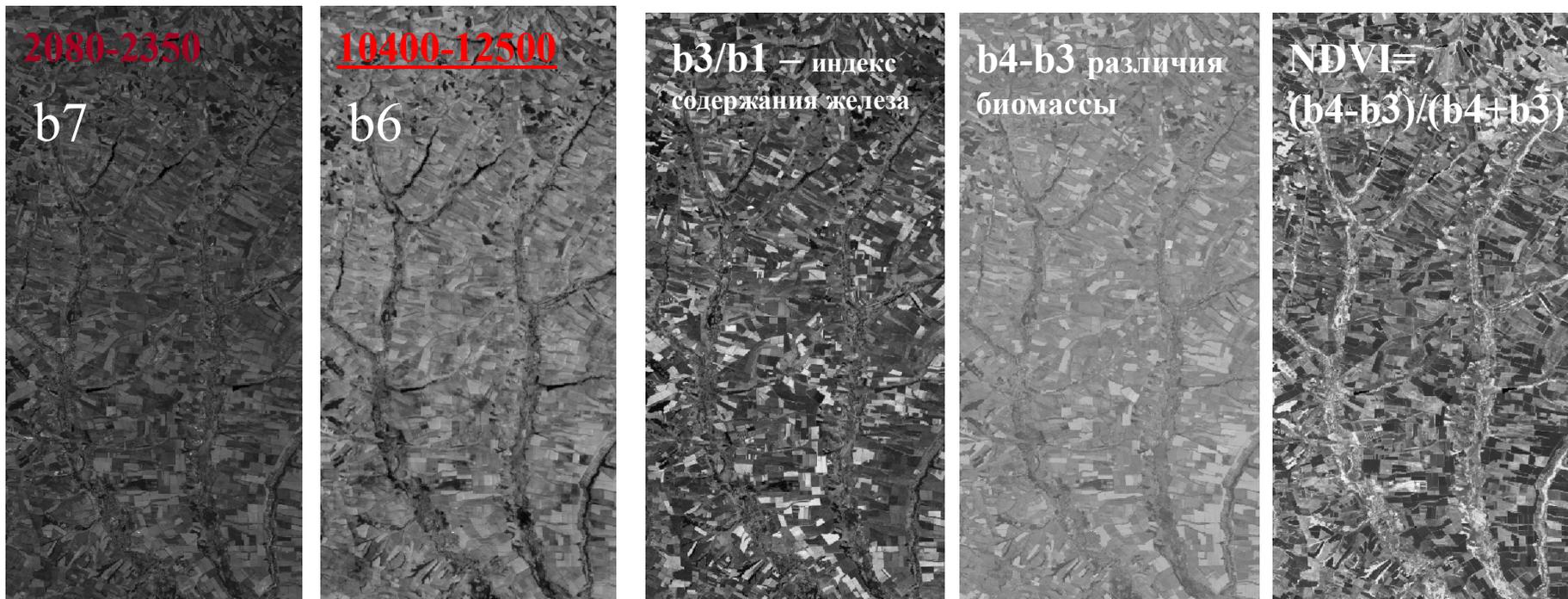
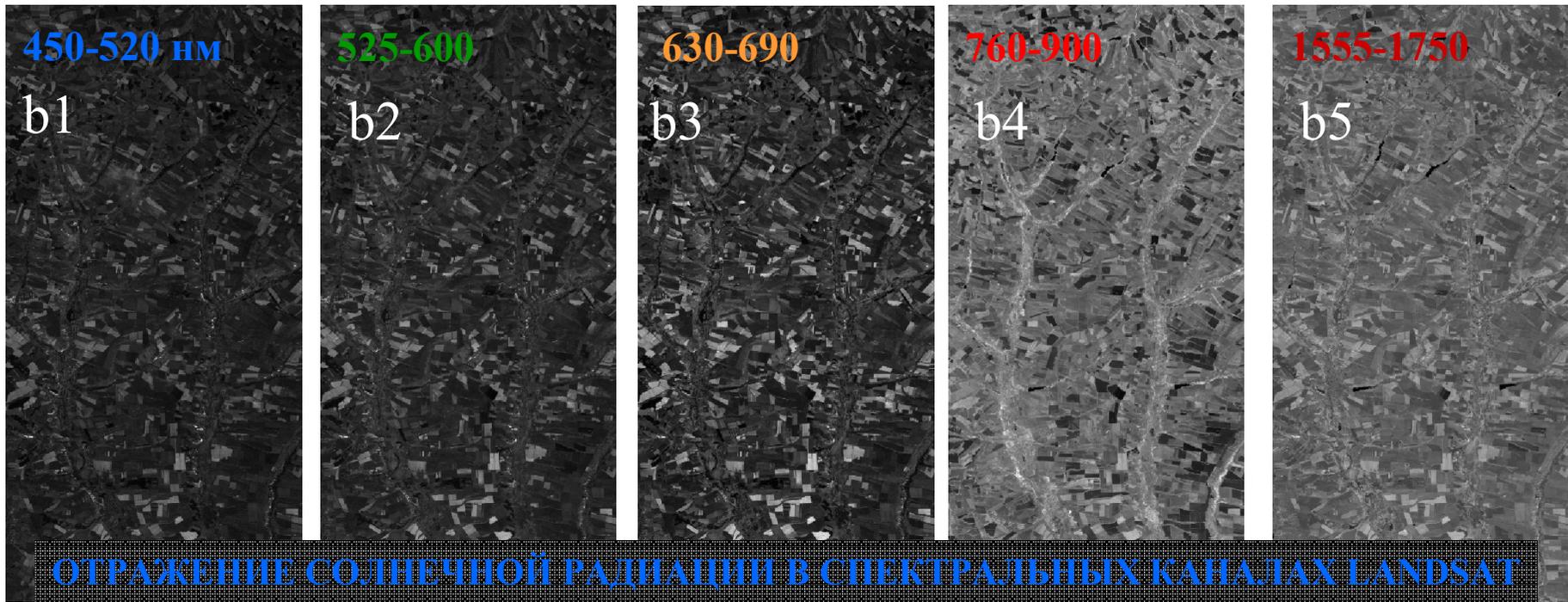
Табл. 1 Распределение элементарных типов форм рельефа

уклон	Форма поверхности (лапласиан)										Тип крутизны
	выпуклые				плоские	вогнутые				Все	
	-4	-3	-2	-1		0	1	2	3		
0	0.00	0.00	0.00	1.87	17.93	1.94	0.08	0.01	0.00	21.83	Слабо пологие
1	0.00	0.00	0.02	3.58	25.63	3.69	0.20	0.02	0.00	33.13	Пологие
2	0.00	0.00	0.05	3.20	15.45	2.99	0.25	0.02	0.00	21.95	Слабо покатые
3	0.00	0.00	0.10	2.29	6.71	1.87	0.19	0.02	0.00	11.19	
4	0.00	0.01	0.12	1.41	2.82	1.14	0.17	0.02	0.00	5.68	
5	0.00	0.01	0.14	0.84	1.22	0.63	0.14	0.02	0.00	2.99	Покатые
6	0.00	0.01	0.11	0.43	0.53	0.33	0.09	0.02	0.00	1.53	
7	0.00	0.01	0.09	0.21	0.24	0.17	0.06	0.01	0.00	0.79	

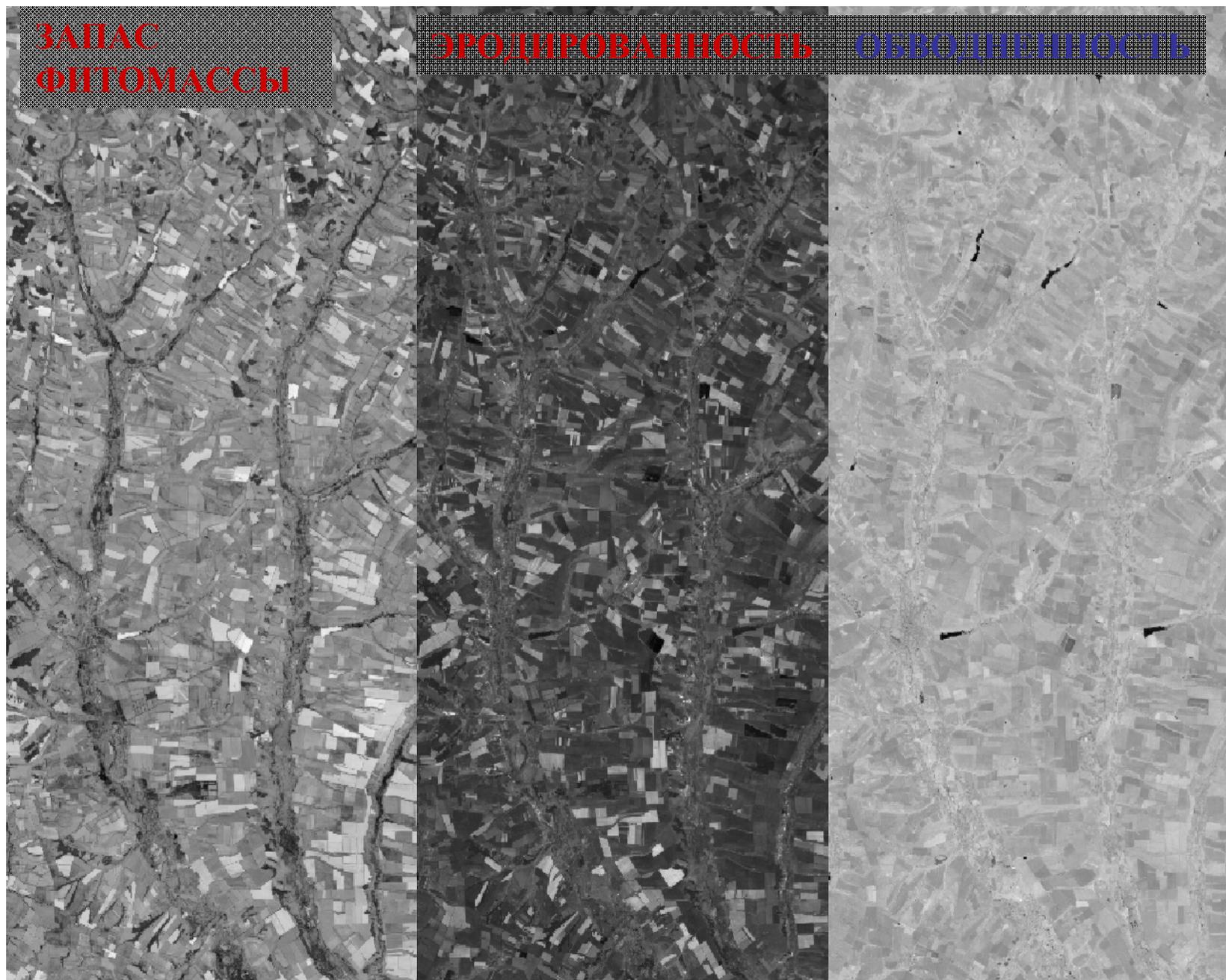
**Состояния растительного и почвенного покрова
отображаются в структуре поглощения солнечной энергии
измеренной со спутника**

Решаемые задачи:

- 1. Расчет индексов нормализованных разностей и отношений между значениями яркостей ШЕСТИ каналов**
- 2. Разложение множества переменных, получаемых через Landsat в ортогональные факторы и идентификация их физического смысла**
- 3. Выделение типов растительного покрова и использования земель**
- 4. Составление карты эрудированности почв**



ФАКТОРНОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ ПЕРЕМЕННЫХ LANDSAT



8	0.00	0.01	0.05	0.10	0.11	0.09	0.04	0.01	0.00	0.42	Крутые
9	0.00	0.01	0.03	0.05	0.05	0.04	0.02	0.01	0.00	0.21	
10	0.00	0.01	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.00	0.00	0.12	
11	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.07	
12	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.03	
13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	
14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	
15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	
Все	0.01	0.08	0.75	14.03	70.73	12.93	1.26	0.17	0.02		

Из табл. 1 следует, что 55% территории практически не подвержены эрозии и деградация почв на этих поверхностях возможна в основном при существенном нарушении агротехники. На рис.1 (fig.3) приведены картографические отображения высоты, уклона и максимальной кривизны поверхности, а на рис. 2 (fig.4) типы рельефа, обобщающие отношения табл. 1. с дополнительным учетом высоты поверхности. Коричневый и зеленый цвета карты выделяют поверхности минимально подверженные плоскостному смыву и эрозии.

Анализ дистанционной информации.

Технология многомерного анализа дистанционной информации для целей предварительного ландшафтного картографирования описана в нескольких методических работах (Пузаченко Ю.Г., Гагаева З.Ш., Алещенко Г.М. Построение мелкомасштабной карты ландшафтного покрова по трехканальному изображению Landsat 7 открытого доступа. Изв. Сер. Географ. 1. 2005. Пузаченко М.Ю., Пузаченко Ю.Г., Козлов Д.Н., Федяева М.В., Картографирование мощности органогенного и гумусового горизонтов лесных почв и болот южнотаежного ландшафта (юго-запад Валдайской возвышенности) на основе трехмерной модели рельефа и дистанционной информации (Landsat 7). Журнал «Исследование земли из Космоса» 1. 2006, Кренке А.Н., Пузаченко Ю.Г. Отображение основных функциональных свойств ландшафтного покрова на основе дистанционной информации для обеспечения начальных стадий проектирования освоения углеводородных и лесных ресурсов // ЛАНДШАФТОВЕДЕНИЕ: ТЕОРИЯ, МЕТОДЫ, РЕГИОНАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, ПРАКТИКА: Материалы XI Международной ландшафтной конференции / Ред. Коллегия: К.Н. Дьяконов (отв. Ред.), Н.С. Касимов и др. – М.: Географический факультет МГУ, 2006. с. 672-673. Кренке, Пузаченко, 2008 Построение карты ландшафтного покрова на основе дистанционной информации.) В табл. 2 показан физический смысл индексов, которые совместно со спектральными отражениями в каналах дают многомерное описание состояния каждого пикселя рассматриваемой территории.

Табл. 2 Форма расчета и смысл индексов.

	Название	Формула	Интерпретация
R_G	Красный к зеленому	B3/B2	разделяет различные типы растительности, водные объекты, заболоченные земли
B5_G	Первый средний инфракрасный к зеленому	B5/B2	разделяет различные типы растительности, водные объекты, заболоченные земли
VI	Индекс растительности	$(B7 - B5) / (B7 + B5)$	выделяет различия биомассы и разделяет типы растительности

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ФАКТОРНЫХ ОТОБРАЖЕНИЙ И РЕЛЬЕФА В СПЕЦИАЛЬНЫЕ КАРТЫ

Основной метод итерационная дихотомическая классификация

NDVI	Нормализованный разностный индекс растительности	$(B4 - B3) / (B4 + B3)$	выделяет различия чистой продукции и транспирации
IR_R	Относительный индекс растительности	$(B4 / B3)$	выделяет различия биомассы
SQRT	Квадратный корень относительного индекса растительности	$(B4 / B3) ** 0.5$	выделяет различия биомассы
VEGI	Разностный вегетационный индекс	$B4 - B3$	выделяет различия биомассы
TNDVII	Трансформированный нормализованный разностный индекс растительности	$((B4 - B3) / (B4 + B3)) + 0.5) ** 0.5$	выделяет различия в интенсивности фотосинтеза, чистой продукции, транспирации, типов растительности
GNDVI	Зеленый нормализованный разностный индекс растительности	$(B4 - B2) / (B4 + B2)$	разделяет растительность по активности хлорофилла
SAVI	Нормализованный разностный индекс растительности скорректированный за влияние почвы	$((B4 - B3) / (B4 + B3) + 0.5) * 1.5$	выделяет различия чистой продукции и транспирации
B_G	Синий к зеленому	$B1 / B2$	выделяет почвы и горные породы с высоким содержанием железа
IR_OX	Индекс содержания оксидов железа	$B3 / B1$	выделяет почвы и горные породы с высоким содержанием оксида железа
R_B7	Красный ко второму среднему инфракрасному	$B3 / B7$	выделяет дороги, селитебные земли, поля и другие антропогенные объекты
CL	Индекс глинистых минералов	$B5 / B7$	выделяет глинистые отложения и горные породы богатые глиной, содержание влаги в растительности и почвах

FER	Индекс железистых минералов	B5/B4	выделяет почвы и горные породы с высоким содержанием железистых минералов и высокое содержание влаги в зеленой биомассе
NDSI	Нормализованный разностный снежный индекс	$(B1 - B4)/(B1 + B4)$	выделяет снег, лед, воду, различия во влажности почв
NDWI	Нормализованный разностный водный индекс	$(B5 - B4)/(B5 + B4)$	различает содержание воды в зеленой биомассе и влажности почвы
NDGR	Нормализованная разность зеленого и красного	$(B2 - B3)/(B2 + B3)$	разделяет различные типы растительности, водные объекты, заболоченные земли

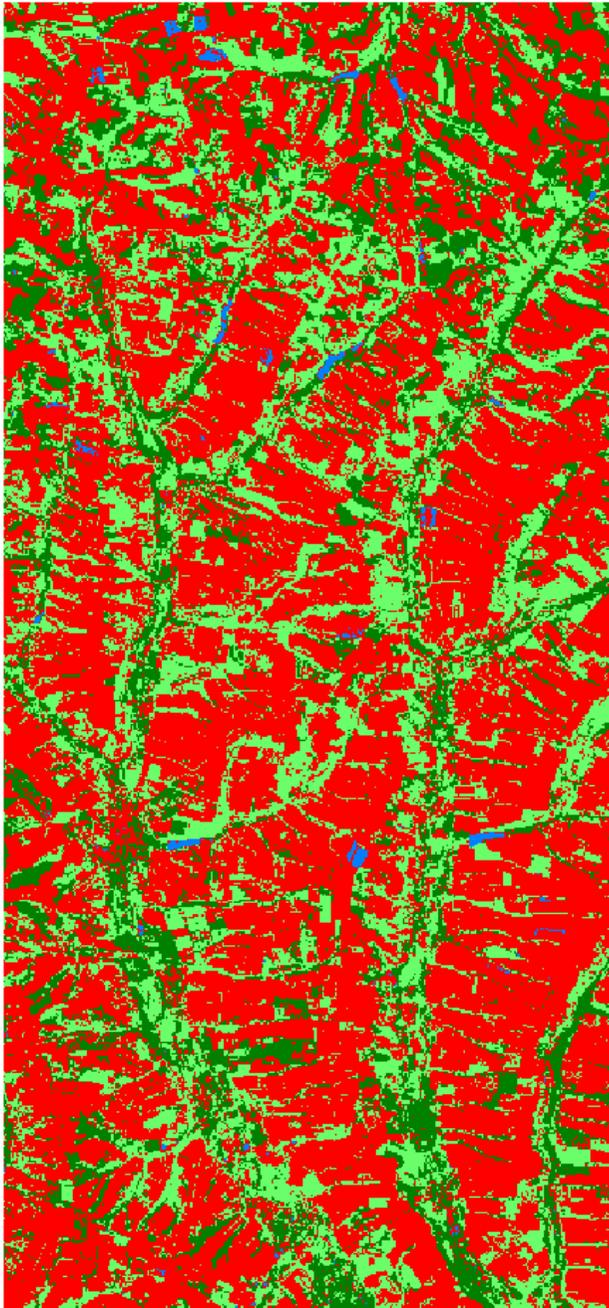
В табл. 3 связи индексов с факторами, полученными на основе факторного анализа.

Табл. 3 Структура связи индексов с базовыми факторами

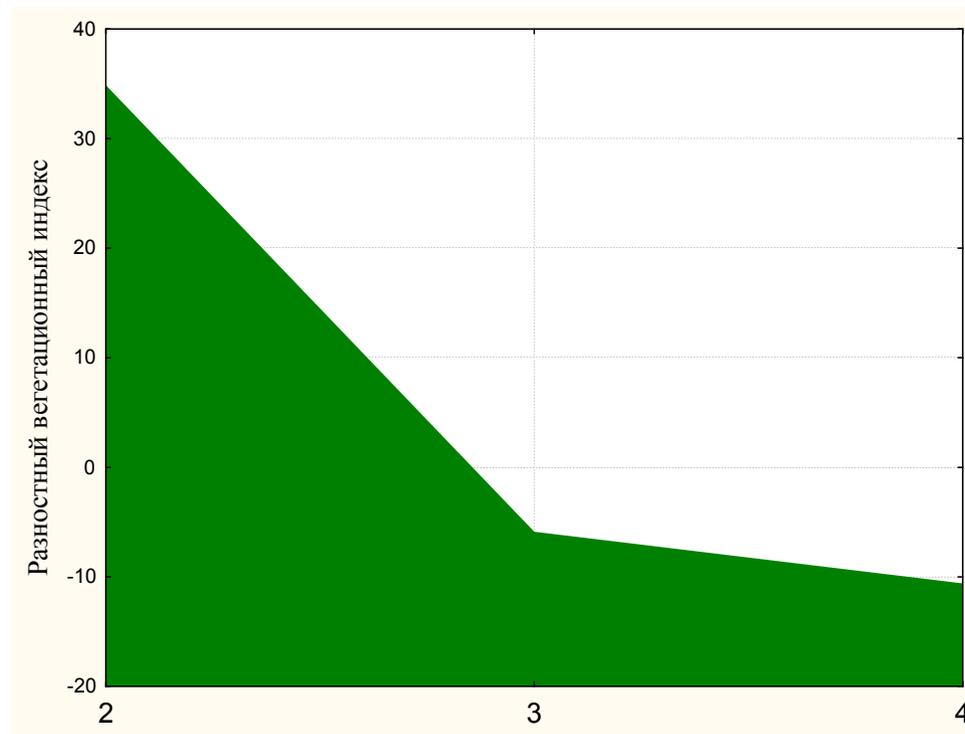
Landsat	Фактор - 1	Фактор - 2	Фактор - 3
B1	0.20272	0.933000	-0.006181
B2	0.04732	0.972951	-0.061419
B3	0.18841	0.972658	-0.050236
B4	-0.90788	0.379519	-0.016299
B5	0.08447	0.882873	0.447775
B6	0.83172	0.130915	0.284157
B7	0.60770	0.600649	0.460077
B_G	0.22636	-0.913529	0.081216
R_G	0.43413	0.870490	0.034898
B5_G	0.08961	0.032783	0.960362
R_B7	-0.34510	0.616569	-0.654272
VI	0.94622	-0.100353	0.130102
NDVI	-0.86692	-0.490059	-0.003380
IR_R	-0.84975	-0.469565	-0.030769
SQRT	-0.86525	-0.483435	-0.018382
VEGI	-0.74841	-0.652808	0.035809
TNDVI	-0.86279	-0.480577	0.020003
IR_OX	0.22058	0.965949	-0.033725
CL	-0.94361	0.036085	-0.119361
FER	0.88292	0.128864	0.381007
GNDVI	-0.96515	-0.229666	0.028586
NDSI	0.99251	-0.019765	0.002294

ТИПЫ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА

1	Вода
2	Леса и кустарники
3	Луга
4	Пашни

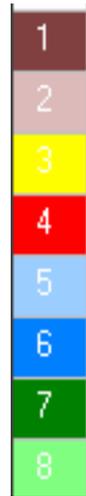
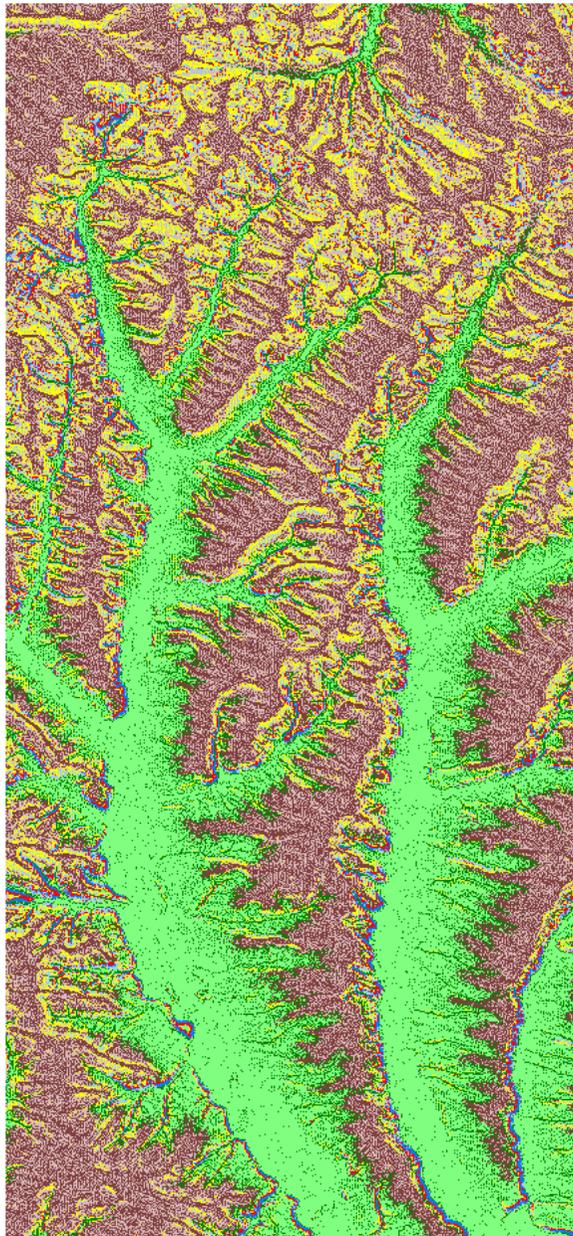


Разностный вегетационный индекс
Выделяет различия биомассы

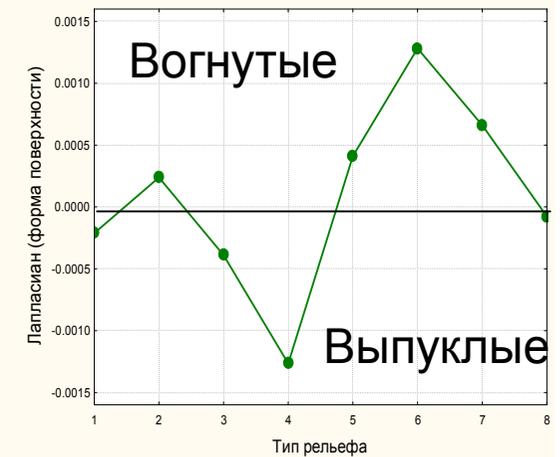
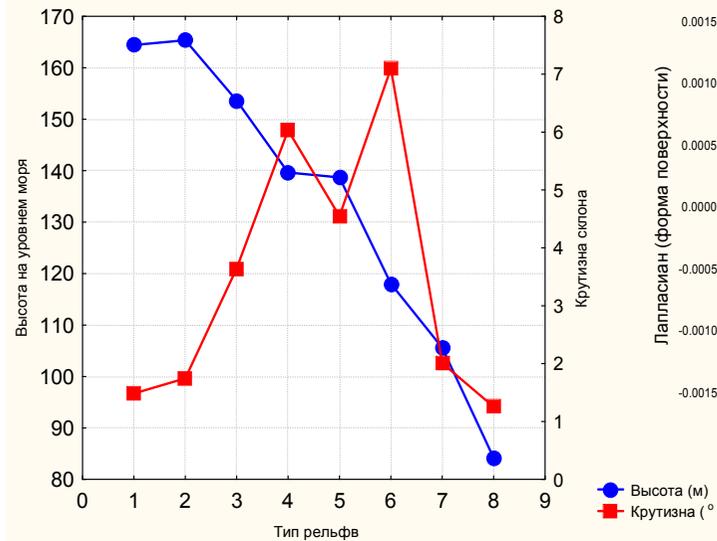


Типы ландшафтного покрова

ФОРМЫ РЕЛЬЕФА



1. Ровные слабовыпуклые возвышенные
 2. Ровные слабовогнутые возвышенные
- Склоны:
3. слабонаклонные выпуклые верхние части
 4. Сильно выпуклые крутые
 5. Слабовогнутые склоны средней крутизны
 6. Сильновогнутые крутые
 7. Вогнутые плоские при долинные
 8. Плоские долины рек



NDWI	0.88894	0.242169	0.368774
NDGR	-0.47311	-0.843621	-0.065194
SAVI	-0.86692	-0.490059	-0.003380
Вес	12.16099	9.414272	2.179232
Вклад в%%%	0.48644	0.376571	0.087169

В соответствии с весом индексов (табл.3) можно утверждать, что первый фактор отражает развитие растительности, причем, чем ниже значение фактора, тем больше масса. Второй фактор отражает степень влияния на отражение содержания в почве железа и, соответственно, уменьшение содержания гумуса. Третий фактор выделяет в первую очередь водные и заболоченные объекты.

Рис. 3 (fig.7) демонстрирует правильность такой трактовки содержания факторов. Запас фитомассы (первый фактор, рис. 3а) устойчиво наибольший по долинам, Высокие значения второго фактора выделяют участки с деградированными почвами (рис 3 б). Низкие значения третьего фактора (рис.3 б) выделяют водоемы, а градации серого степень увлажнения.

На основе первого фактора можно составить карту типов растительного покрова (рис. 4, Fig.9). Комбинируя эту карту с типами рельефа, получаем карту ландшафтного покрова, с учетом растительности, отражающей потенциальную эродлируемость почв (рис. 5? Fig.10). Очевидно, что типы под лесом и лугами потенциально слабо эродлируемы и наиболее эродлируемы 20-23 типы ландшафтного покрова.

Второй фактор прямо определяет содержание углерода. Зная амплитуду запасов углерода в регионе, можно поставить в соответствие значениям фактора определенные значения содержания углерода (Кравцова В.И. Космические методы исследования почв. Аспент пресс. М. 2005 стр. 189). На рис.5 (fig.11) представлена экспертная оценка варьирования запасов углерода для территории. Светлым тонам соответствуют почвы бедные углеродом.

Если содержание углерода равновесно относительно рельефа и растительности то содержание углерода должно быть их функцией. Отклонения от равновесия будут выделять деградирующие почвы. Гипотезу равновесности можно проверить с помощью дискриминантного анализа, пытаясь различить состояния запасов гумуса на рис.5 по переменных рельефа с учетом второго и третьего факторов.

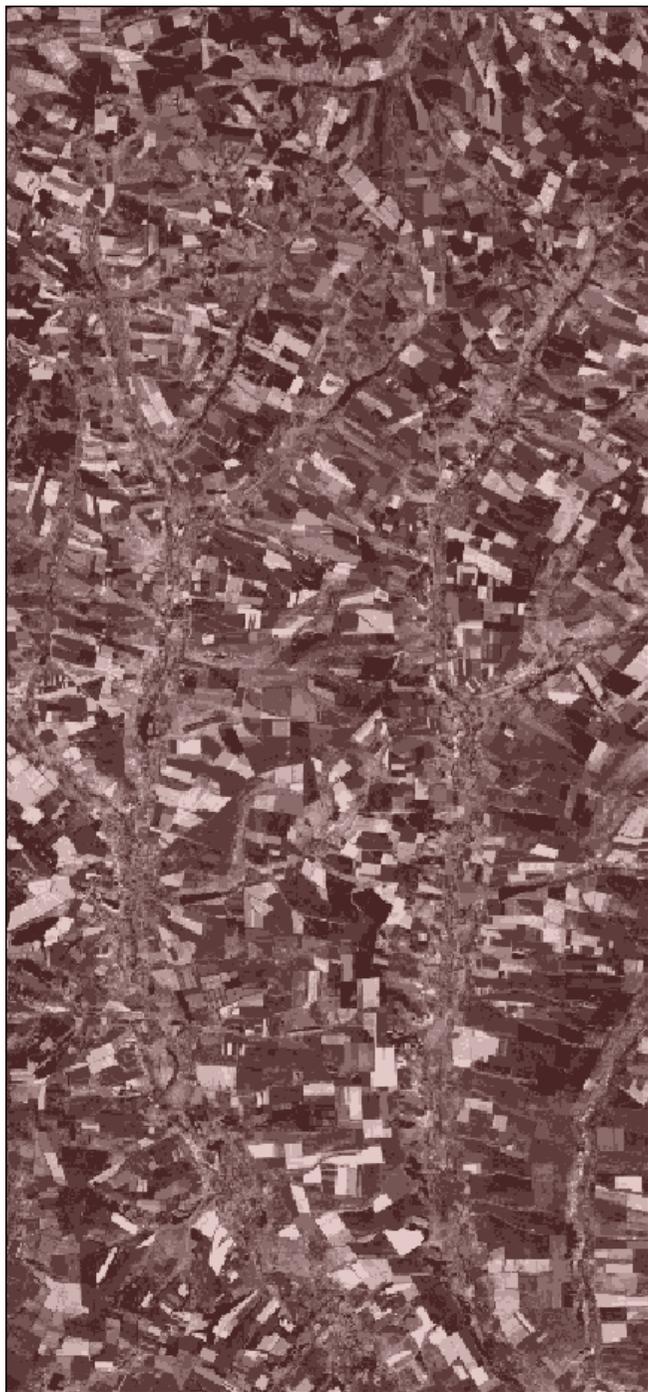
Табл. 4 Статистическая значимость дискриминантной модели ($R^2= 0.2035$)

Ось	Вес	Каноническая корреляция	χ^2	df	p-level
1	0.180682	0.391193	89634.08	84.00000	0.000000
2	0.029994	0.170648	23562.33	66.00000	0.000000
3	0.024603	0.154960	11805.97	50.00000	0.000000
4	0.004334	0.065690	2137.17	36.00000	0.000000
5	0.000883	0.029699	416.87	24.00000	0.000000
6	0.000157	0.012534	65.83	14.00000	0.000000
7	0.000008	0.002894	3.33	6.00000	0.766316

Дискриминантная модель статистически значима (табл.4), но коэффициент детерминации не высок, что указывает на существенное нарушение равновесных отношений.

Табл. 5 Нарушение равновесия в отношении запасов углерода к внешним переменным (в строках % распознавания класса относительно каждого исходного)

Классы	Воспроизведенные классы содержания углерода
--------	---



	г на кв м
1	30130.00
2	27240.00
3	24370.00
4	21360.00
5	18030.00
6	14330.00
7	9630.000
8	3370.000

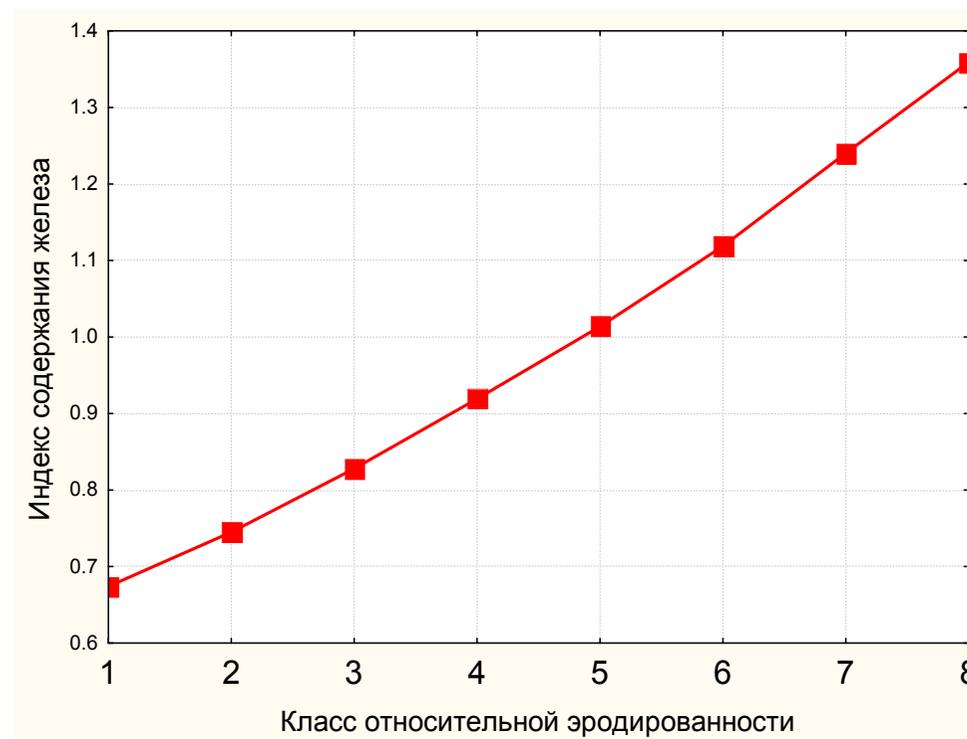
Экспертная оценка запасов углерод в почве.

Средняя чистая биологическая продукция - 259.7 г на кв. м.

Средний запас углерода - 10915.2 г на кв м

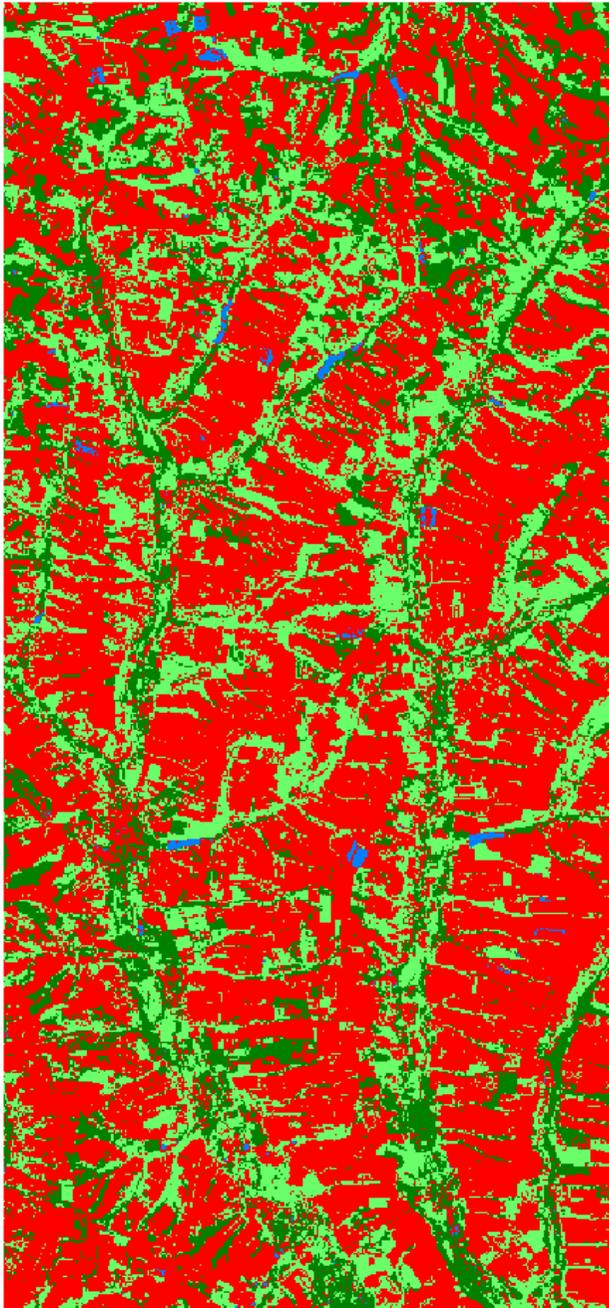
Интенсивность дыхания **-0.0232**

Индекс содержания железа

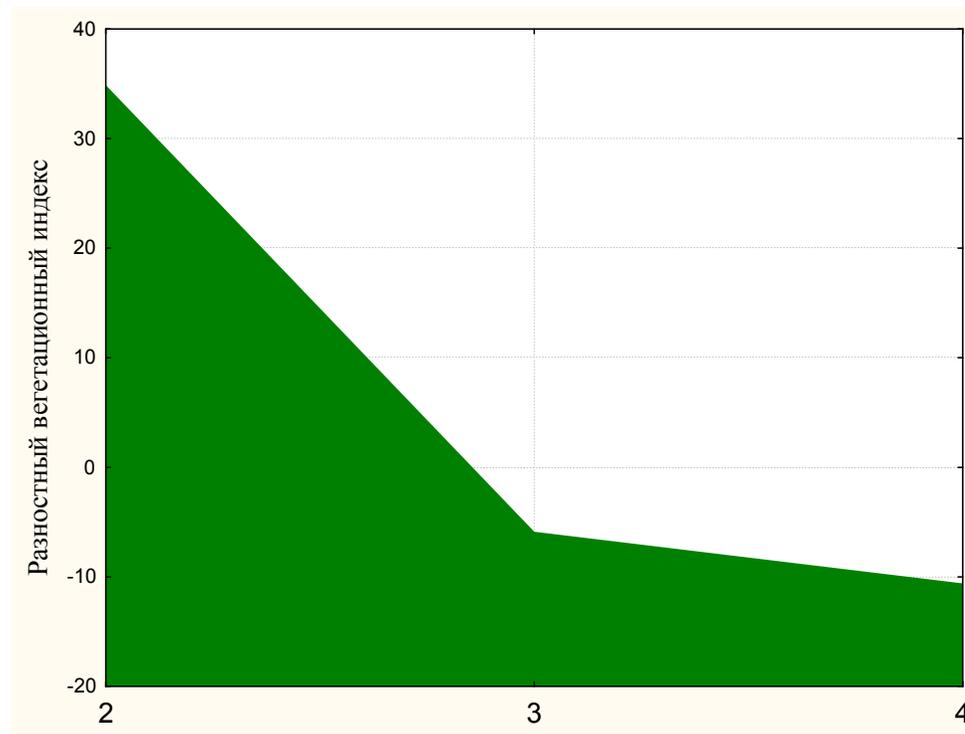


ТИПЫ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА

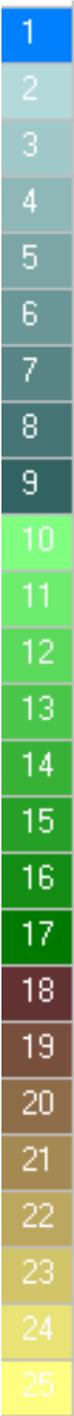
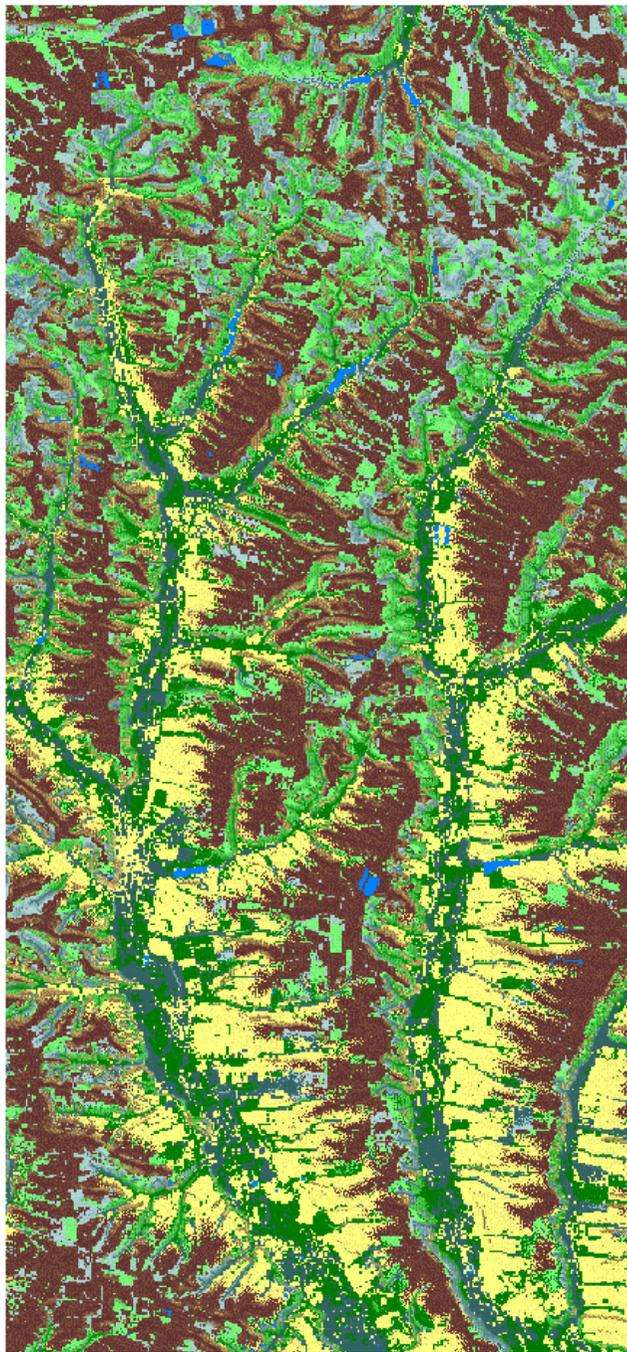
1	Вода
2	Леса и кустарники
3	Луга
4	Пашни



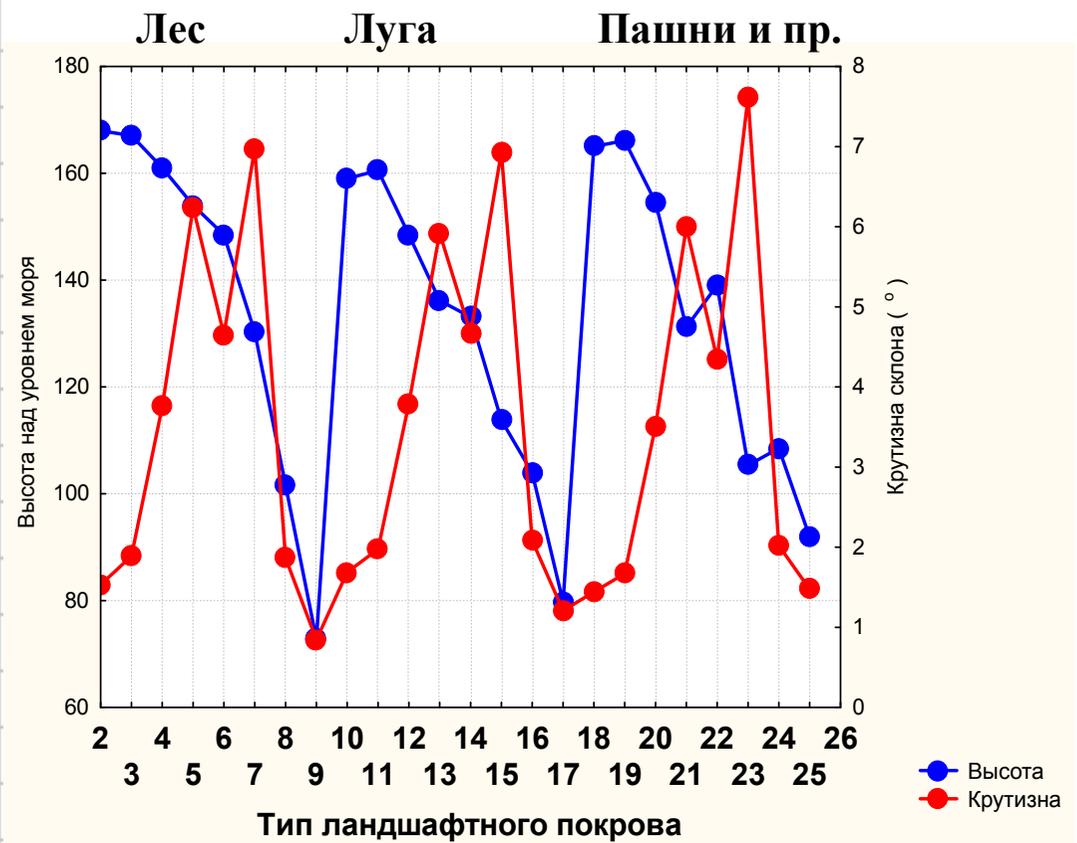
Разностный вегетационный индекс
Выделяет различия биомассы



Типы ландшафтного покрова



Типы ландшафтного покрова



заданные	1	2	3	4	5	6	7	8
1	<u>41.87</u>	9.20	11.07	3.71	7.20	7.63	6.08	13.24
2	23.62	<u>14.20</u>	13.17	3.61	14.86	7.45	4.13	18.96
3	13.51	9.98	<u>27.98</u>	11.81	19.55	4.81	3.16	9.20
4	13.93	4.85	24.39	<u>19.19</u>	21.50	2.98	4.57	8.58
5	18.10	3.16	15.27	21.68	<u>20.39</u>	3.40	5.27	12.71
6	25.53	5.38	8.73	12.12	14.24	<u>5.50</u>	7.34	21.16
7	30.53	7.19	5.81	2.24	6.19	8.00	<u>14.22</u>	25.80
8	18.09	6.20	2.72	.65	2.72	4.40	8.46	<u>56.76</u>
Всего	21.95	9.02	17.10	10.04	15.77	5.63	5.18	15.31

В табл. 5 показано соотношение классов заданных в модели (первый столбец) к классам определенным в дискриминантном анализе. Так первый класс с максимальным содержанием углерода равновесен внешним переменным в 41,8%, второй – только 14% , третий 27,98% и т.д. Классы над диагональю отражают степень деградации чернозема. Так для первого класса максимально нарушенные почвы соответствуют 8 классу и такое нарушение существует в 13,24%.

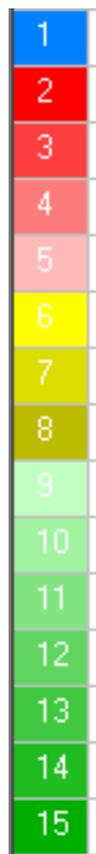
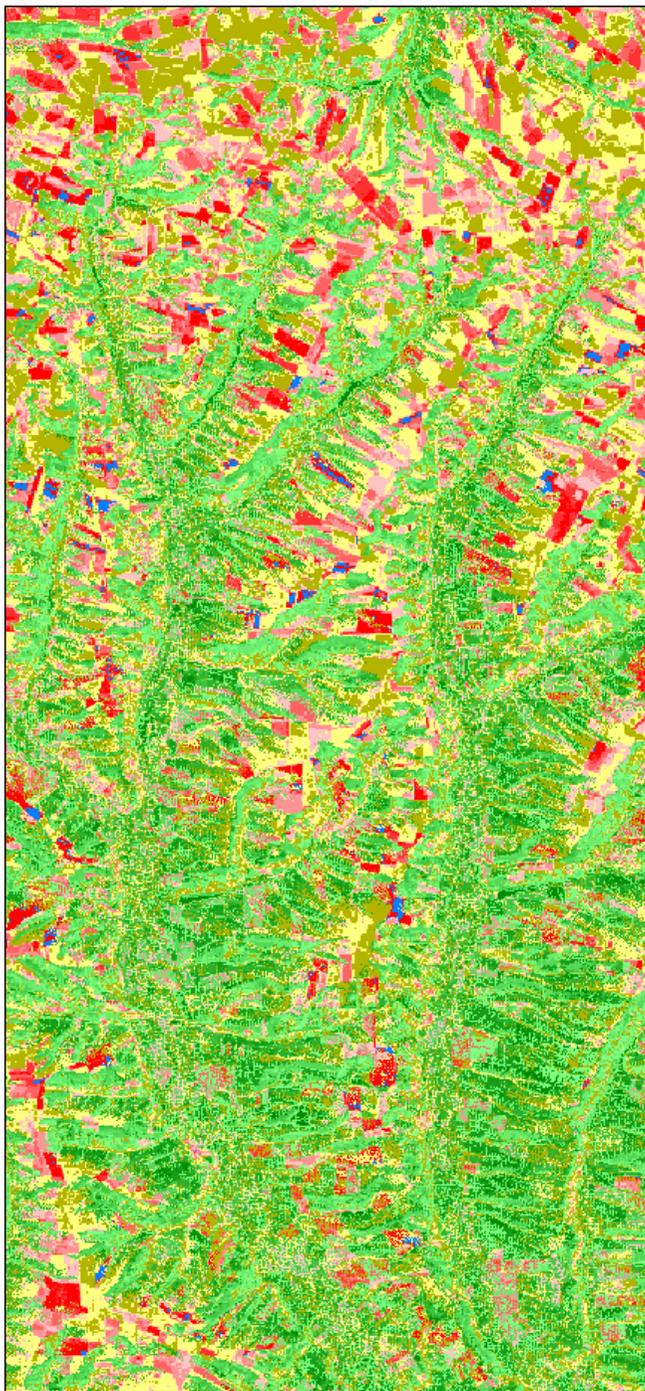
Если вычесть из номера класса предсказанного в дискриминантном анализе, номер исходного, то получаем масштаб и знак отклонения каждого пикселя от равновесия. Положительные отклонения маркируют степень деградации почв, а отрицательные нарушения равновесия определяемые относительно большими запасами гумуса. В соответствии с задачей нас интересуют положительные отклонения. На рис. 6 (fig. 14) показано размещение в пространстве почв с разным уровнем и знаком отклонения от равновесия. График в легенде к карте показывает, что степень деградации хорошо отражается индексом «оксида железа». На этой основе можно рассчитать процент деградированных почв, равновесное содержание в них углерода и оценить возможный сток углерода при исключении этих почв из распашки.

Оценка изменения запасов углерода при исключении из сельскохозяйственного оборота деградированных почв.

Ранее для рассматриваемого региона в рамках проекта «Запасы углерода.....» были определены запасы углерода и чистая биологическая продукция с разрешением для квадрата со стороной 8 км. Эти оценки позволяют поставить в соответствие значениям второго фактора отражающего содержание органического вещества в почве и индекса, отражающего содержание оксида железа, средние ожидаемые значения углерода в почве. На основе этих же данных определен средний запас углерода (CARB) -10915.2 г на кв м и средняя чистая продукция (NPP)- 259.7 г на кв м (Fig. 11). Используя модель Костычева можем оценить интенсивность равновесного дыхания почвы в долях углерода в долях от углерода, содержащегося в почве $q=R/(1+R)=(NPP/CARB)/(1+NPP/CARB)=0.023$. Таким образом, в среднем ежегодно в атмосферу выделяется около 2.3% от суммы углерода в чистой продукции и почве.

Этот параметр можно считать как средний для климата региона и использовать его для оценки увеличения запасы углерода в деградированных почвах при исключении их из хозяйственного использования. При расчетах допускается, что естественная региональная чистая продукция на залежи будет получена уже в первый год. Практика показывает, что естественная продукция на залежи в степи восстанавливается очень быстро.

Таким образом, запаса углерода за 10 лет для залежных почв оценивается как $CARB_t=CARB_0p^t+NPP(p+p^2+\dots+p^{10})$, где $p=1-q$. Принимая средний запас углерода ($CARB_0$) в деградированных почвах, занимающих 13,4% от территории равным 3370 г на кв м , получаем , что дополнительно на 1 кв м за 10 лет будет накоплено 2204.8 г углерода. Исходя из того, что такие почвы занимают 13% территории

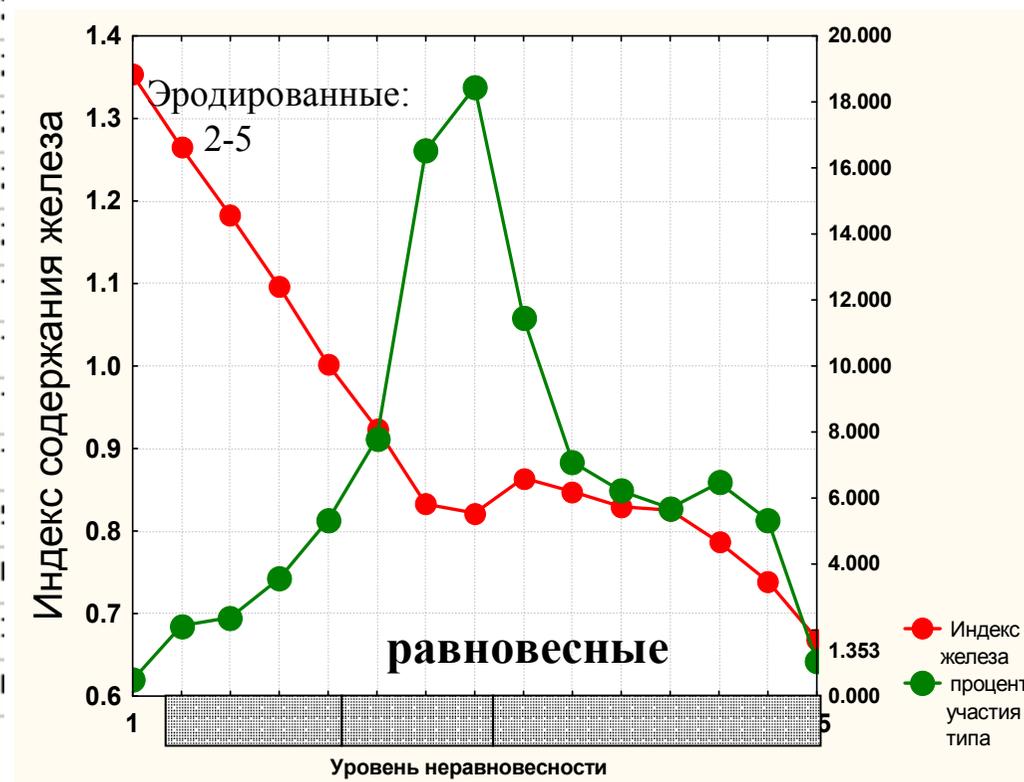


Уровни неравновесности почв на основе дискриминантного анализа.

Эродированных почв 13.4%

При исключения из распашки за десять лет на 1 кв м будет накоплено 2204.8 г углерода.

В среднем на 1 га территории 2954.5 кГ углерода



получаем, что для всей территории в среднем на 1 га территории 2954.5 кГ углерода (около 3 тонн).

Оценим возможные источники ошибок и их влияние на полученную оценку.

1. Чистая продукция зависит от типа местообитания, а в расчетах принято среднее значение. В данном случае деградированные почвы распространены в основном на плакорах, занимающих почти 50% и в норме имеющих чистую биологическую продукцию близкую к средней.
2. Запасы углерода в почвах поставлены в соответствие значениям фактора, отражающего содержание углерода в почве пропорционально, исходя из региональной амплитуды варьирования полученной в модели с разрешением 8x8 км. Реально зависимость не обязана быть линейной, но нелинейность скорее всего в наибольшей степени будет проявляться при больших запасах углерода.
3. Допускается, что за расчетные 10 лет климат не претерпевает существенных изменений. Реальная динамика температуры и осадков за сто лет для этого региона не выявляет трендов способных существенно изменить интенсивность дыхания почв.

Учитывая все возможные ошибки и эффекты осреднения можно полагать что реальное накопление углерода при принятых условия лежит в интервале 2-4 тонн на га.

Вместе с тем приведенные оценки деградации степенных почв следует рассматривать как экспертные. Строго количественный характер они будут иметь при проведении полевого опробования содержания углерода в почве и чистой продукции в соответствии со схемой, вытекающий из рис.5 (Fig. 11)