

Глазунов Г.П., Евдокимова М.В., Титарев Р.П., Шестакова М.В.

Факультет почвоведения МГУ им. М.В.Ломоносова, кафедра
земельных ресурсов и оценки почв

Макроскопическая кинетика временной и пространственной
изменчивости вегетационного индекса NDVI на территории участка
«Ямская степь» заповедника «Белогорье» в условиях загрязнения
почвы тяжёлыми металлами

mail: glazng@mail.ru

Москва 14 ноября 2019

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, грант № 18-34-00037
мол-а.

Скорости роста клеточной биомассы и изменения концентрации веществ

$$\begin{cases} \frac{dq}{dt} = F(c_{ik})q \\ \frac{dc_{ik}}{dt} = m_k (v'_{ik} - v''_{ik}) \varepsilon_i \frac{1}{\rho} \end{cases}$$

q – биомасса клеток [кг],

t – время [с],

$F(c_{ik})$ – коэффициент скорости биохимической реакции [1/с],

c_{ik} – концентрация k – того вещества [кг/кг] в i – той реакции,

m_k – молекулярная масса

k – того A_{ik} вещества [кг/м³],

ε_i – скорость протекания

i – той реакции [1/с],

ρ – плотность системы клетки-субстрат [кг/м³]

Химические превращения

$$\sum_{k=1}^{N_i} A_{ik} v'_{ik} \rightleftharpoons \sum_{k=1}^{N_i} A_{ik} v''_{ik}$$

v'_{ik}, v''_{ik} – соответственно,
стехиометрические
коэффициенты k – того
вещества

A_{ik} – химический символ k – того вещества в i – той реакции,
 $k = 1, \dots, N_i; i = 1, \dots, n$

Биохимические превращения

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{N_i} A_{ik} \mu'_{ik} \rightleftharpoons \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{N_i} A_{ik} \mu''_{ik}$$

μ'_{ik}, μ''_{ik} – соответственно,
стехиометрические
коэффициенты k – того вещества

Коэффициент скорости биохимической реакции

$$F(c_{ik}) = (-KZ + B)\Psi$$

K – коэффициент скорости увеличения биомассы,

B – коэффициент скорости уменьшения биомассы

$$Z = \frac{1}{\sqrt[n]{\prod_{i=1}^n \prod_{k=1}^{N_i} c_{ik}^{\mu'_{ik} - \mu''_{ik}}}}$$

$$\Psi = \left(-\frac{1}{n}\right) \left[\sum_{i=1}^n \frac{m_k \varepsilon_i}{\rho} \sum_{k=1}^{N_i} \frac{(v'_{ik} - v''_{ik})(\mu'_{ik} - \mu''_{ik})}{c_{ik}} \right]$$

Решение

При фиксированных начальных концентрациях компонентов субстрата – уравнение роста

$$q = \sigma t^{-\beta} \exp\left(-\frac{\omega}{t}\right)$$

При фиксированном времени – дозовая зависимость

$$q = \theta z^{-\lambda} \exp\left(-\frac{\delta}{z}\right)$$

$$z = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n (c_{i1}^{\circ})} \quad \text{– среднее геометрическое из концентраций}$$

КОМПОНЕНТОВ

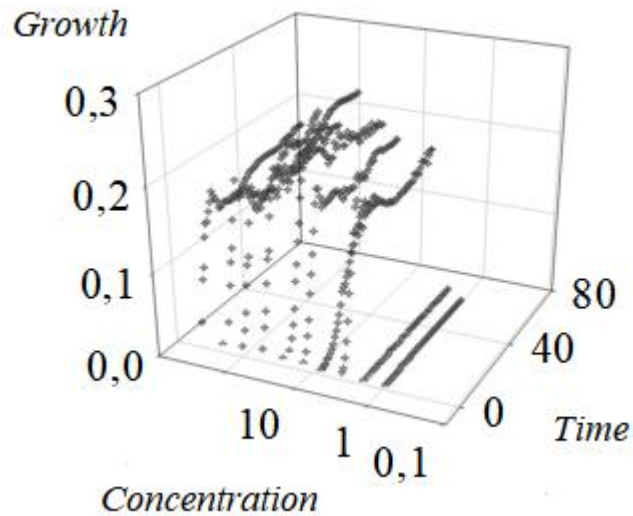
Уравнение роста (при фиксированных начальных концентрациях компонентов субстрата)

$$q = \sigma t^{-\beta} \exp\left(-\frac{\omega}{t}\right)$$

σ – масштабирующий коэффициент

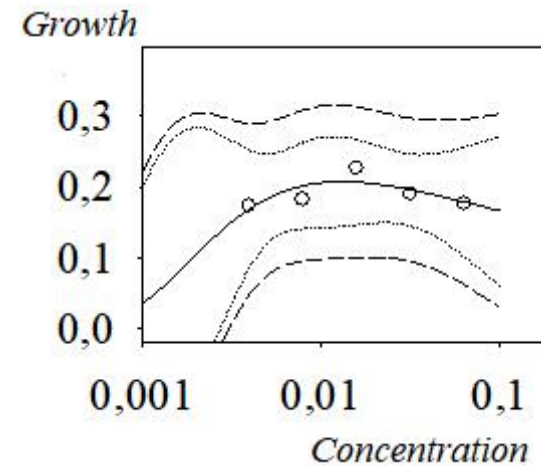
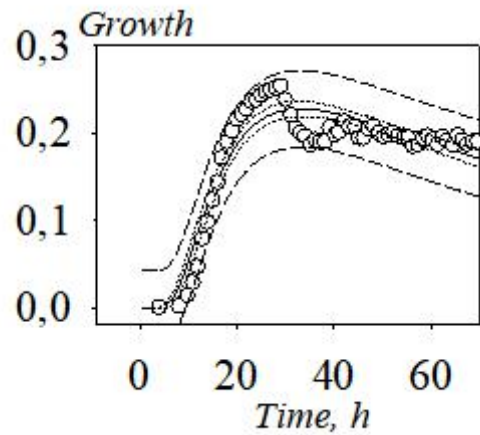
β – коэффициент скорости уменьшения биомассы вследствие отмирания клеток

ω – коэффициент скорости увеличения биомассы вследствие отрастания клеток



**Моделирование роста микробов
и отклика на действие стрессора**

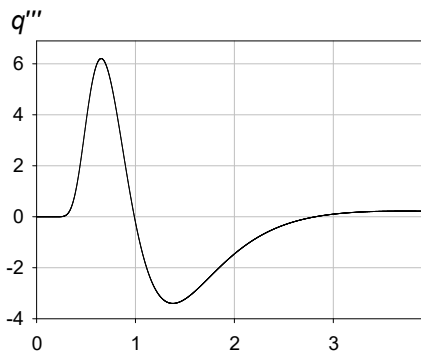
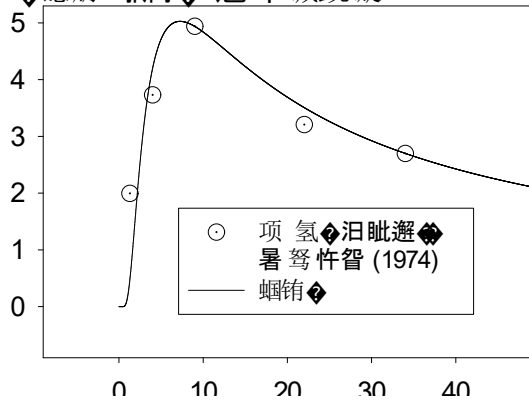
**Modelling of microbial growth and
dose-response.**



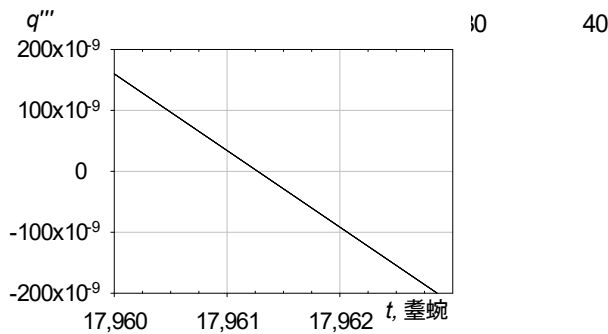
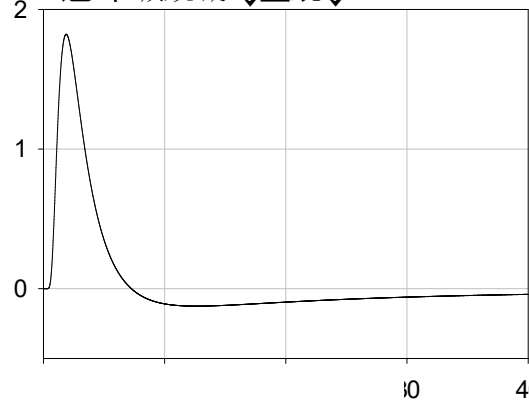
$$q_{z=const} = \sigma t^{-\beta} \exp\left(-\frac{\omega}{t}\right)$$

$$q_{t=const} = \theta z^{-\lambda} \exp\left(-\frac{\delta}{z}\right)$$

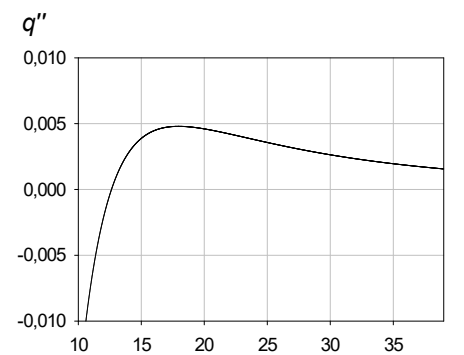
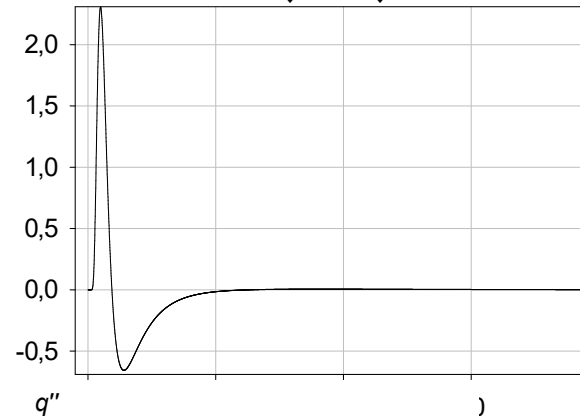
q, 精遂僚 麒矜 规彗泥
 镜脉 琊呵 扈竿 钺靛



q', 麒矜 规彗泥 镜脉 琊呵
 扈竿 钺靛 奎蜿



q'', 麒矜 规彗泥 镜脉 琊呵
 扈竿 钺靛 奎蜿 汀奎蜿



Особая точка

t_0 – начала роста

t_1 – наибольшей вогнутости слева от максимума

t_2 – перегиба слева от максимума

t_3 – наибольшей выпуклости

t_4 – максимума

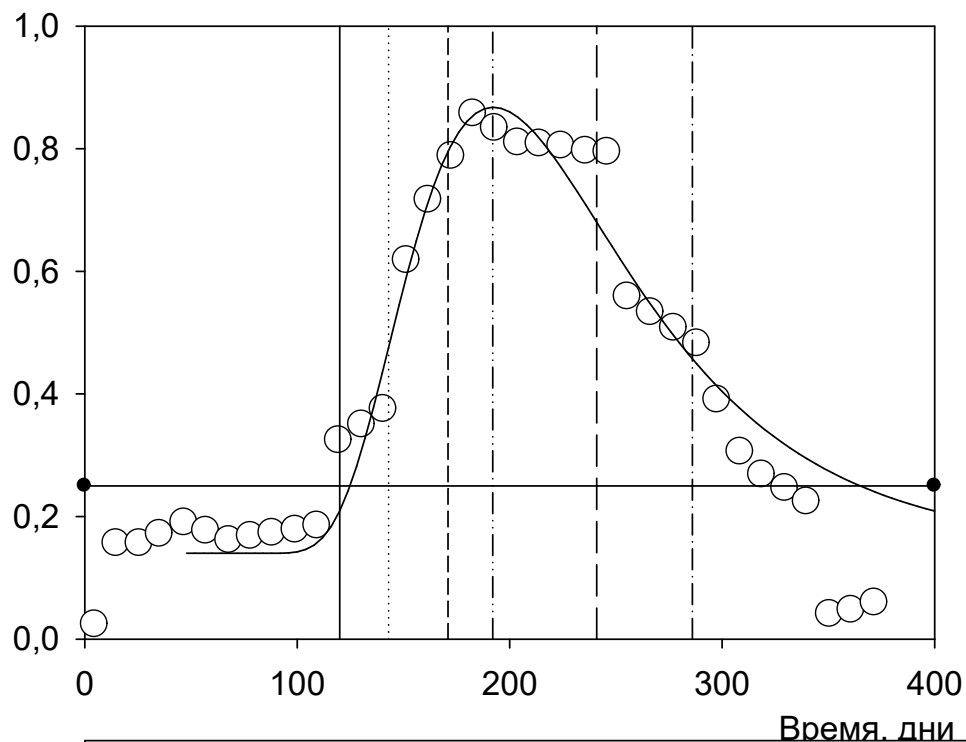
t_5 – перегиба справа от максимума

t_6 – наибольшей вогнутости справа от максимума

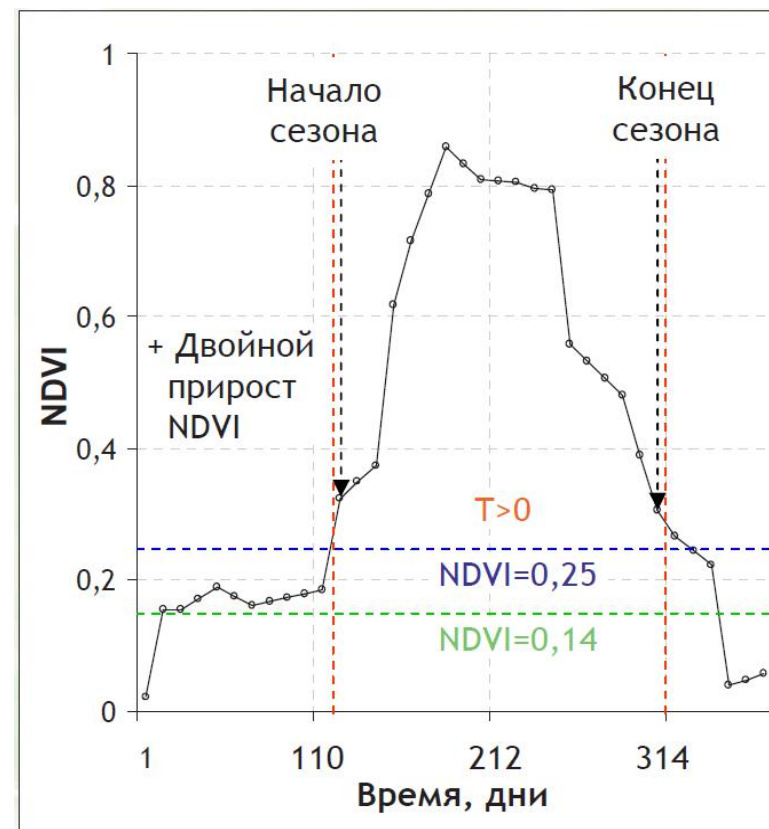
Интервал

Интервал	q	q'	q''
$t_0 < t \leq t_1$	+↑	+↑	+↑
$t_1 < t \leq t_2$	+↑	+↑	+↓
$t_2 < t \leq t_3$	+↑	+↓	-↓
$t_3 < t \leq t_4$	+↑	+↓	-↑
$t_4 < t \leq t_5$	+↓	-↓	-↑
$t_5 < t \leq t_6$	+↓	-↑	+↑
$t_6 < t$	+↓	-↑	+↓

Моделирование динамики вегетационного индекса NDVI



- Измеренные величины
- Точка наибольшей вогнутости (в начале сезона)
- ⋯ Точка перегиба (в начале сезона)
- - - Точка наибольшей выпуклости (в начале сезона)
- ⋯ Точка максимума
- - - Точка перегиба (в конце сезона)
- - - Точка наибольшей вогнутости (в конце сезона)
- Расчет по формуле роста
- NDVI = 0,25



По данным С.А.Барталева и др., 2010

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

При фиксированных начальных концентрациях компонентов субстрата – уравнение роста (сезонной динамики)

$$q = \sigma t^{-\beta} \exp\left(-\frac{\omega}{t}\right)$$

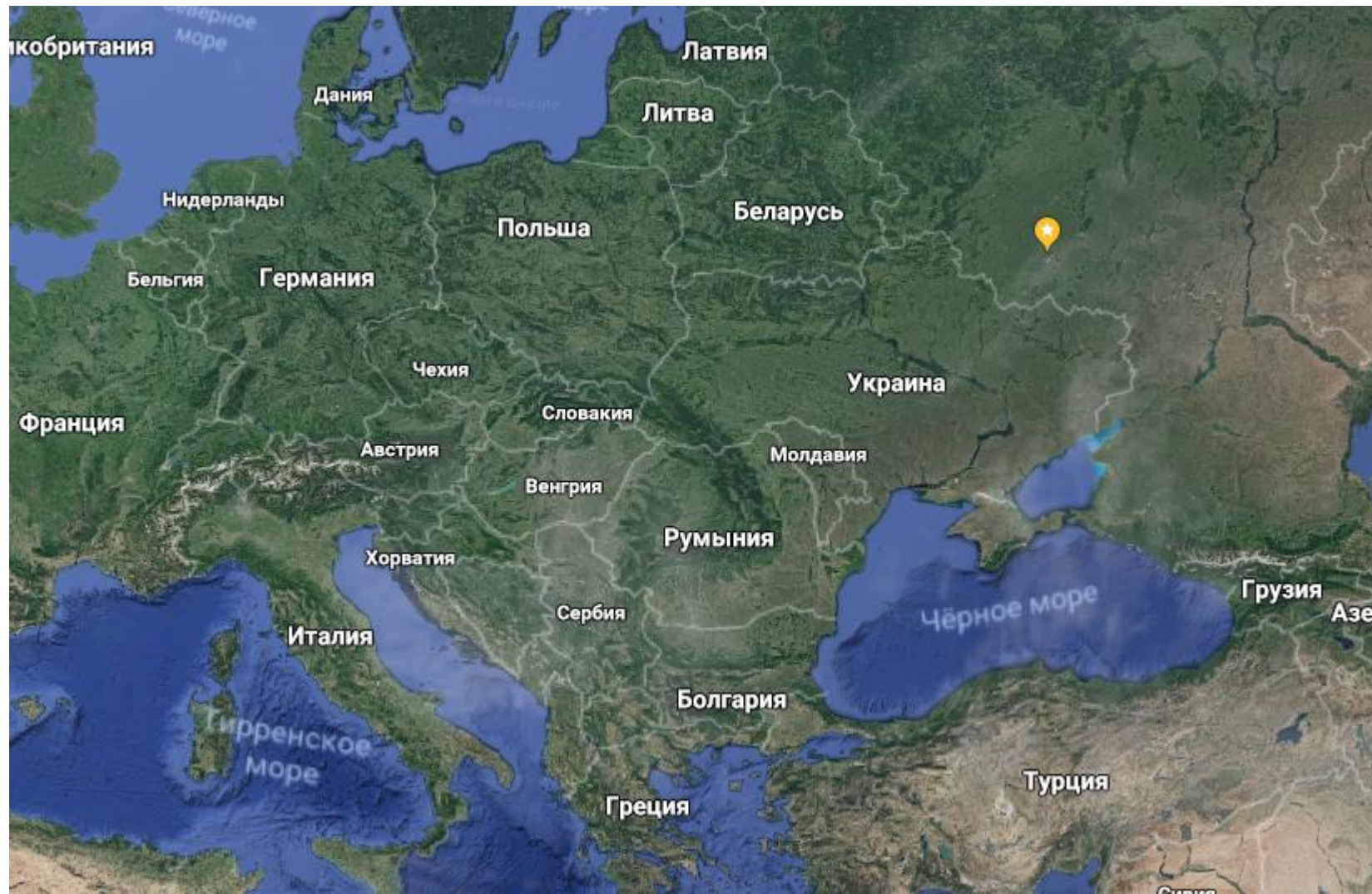
При фиксированном времени – дозовая зависимость

$$q = \theta z^{-\lambda} \exp\left(-\frac{\delta}{z}\right)$$

$$z = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n (c_{i1}^{\circ})} \quad \text{– среднее геометрическое из концентраций}$$

КОМПОНЕНТОВ

Карьер в районе Губкина и Старого Оскола.



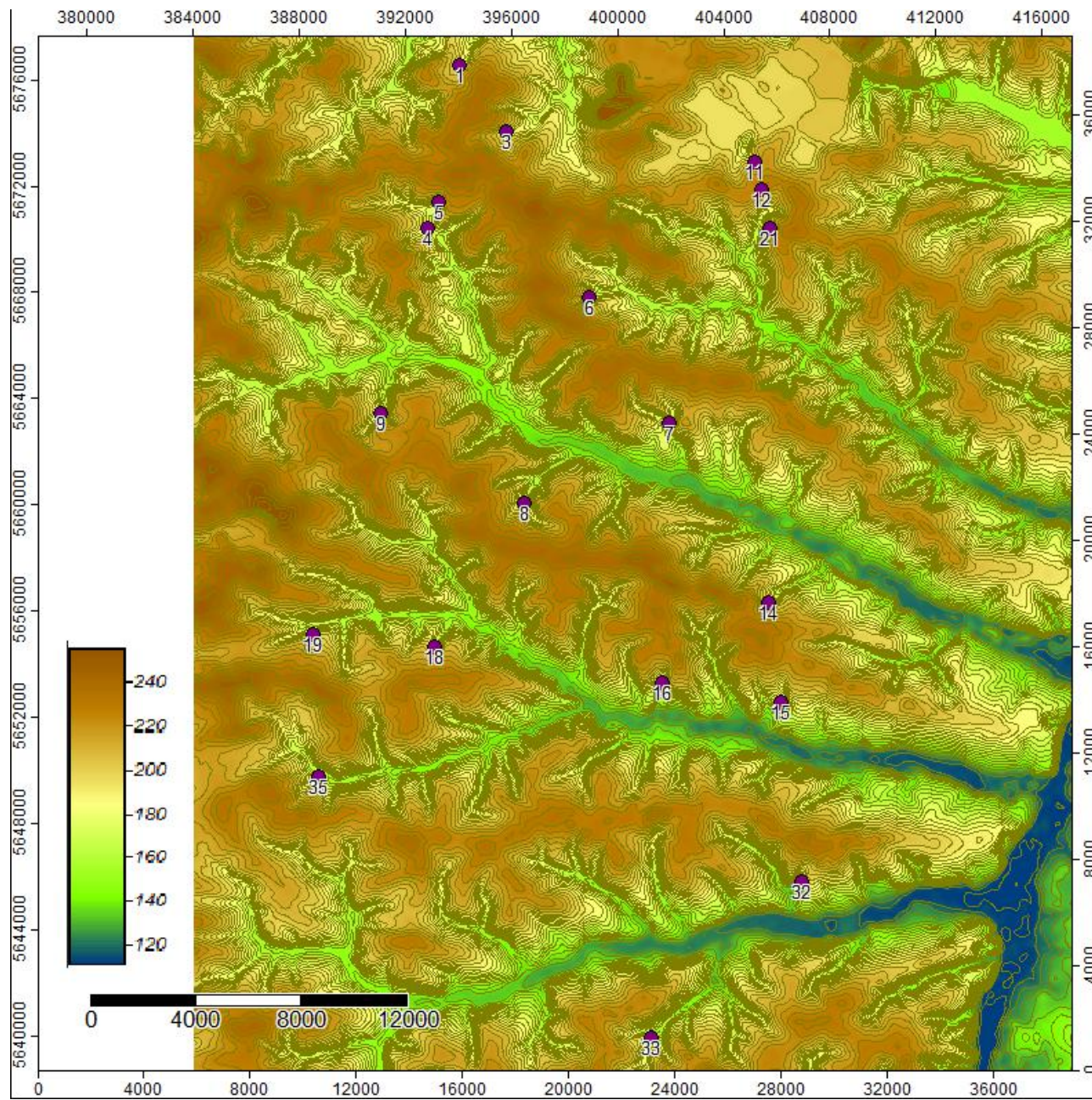
Карьер в районе Губкина и Старого Оскола.



Карьер в районе Губкина и Старого Оскола.



Карта рельефа.

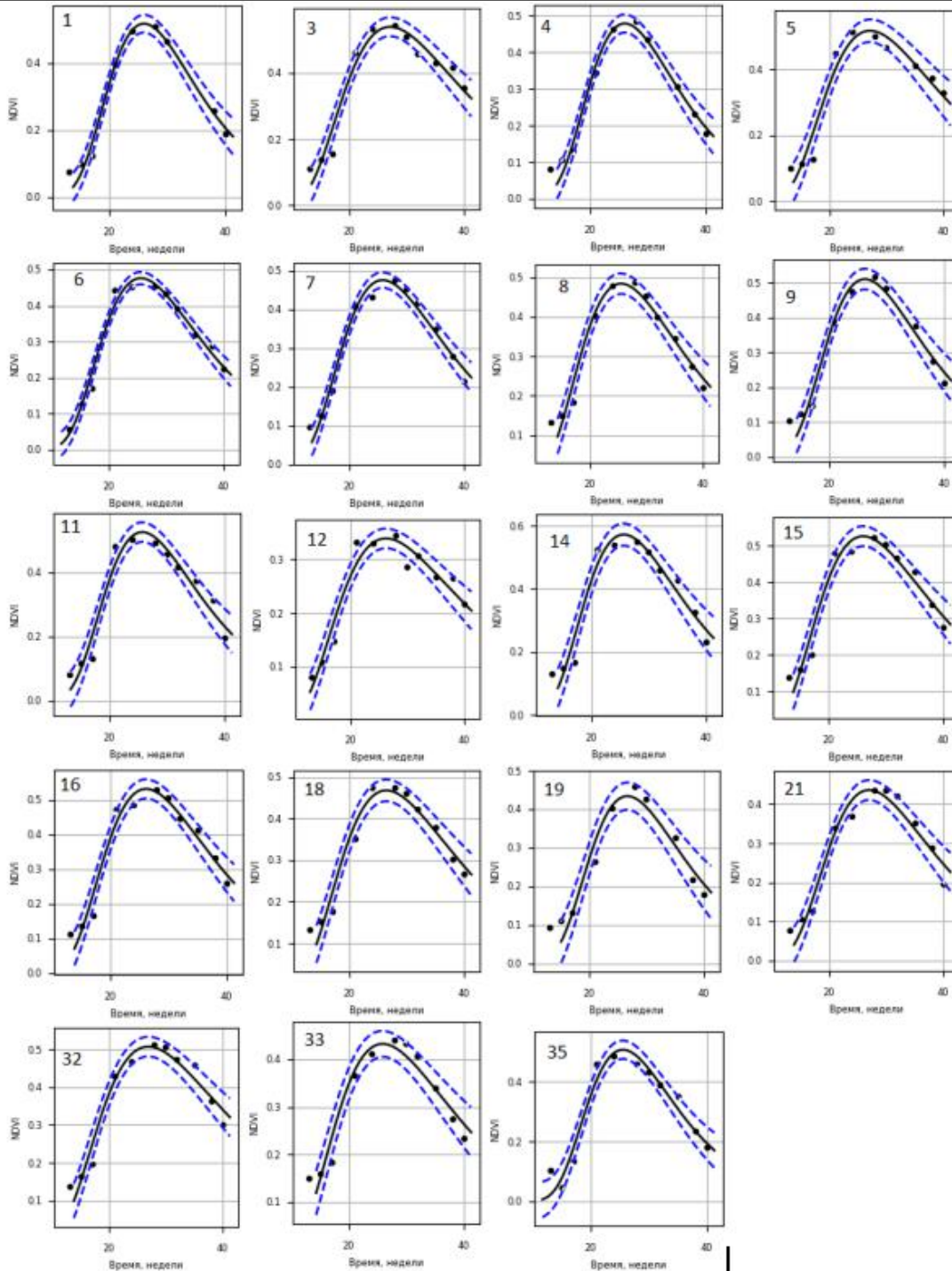


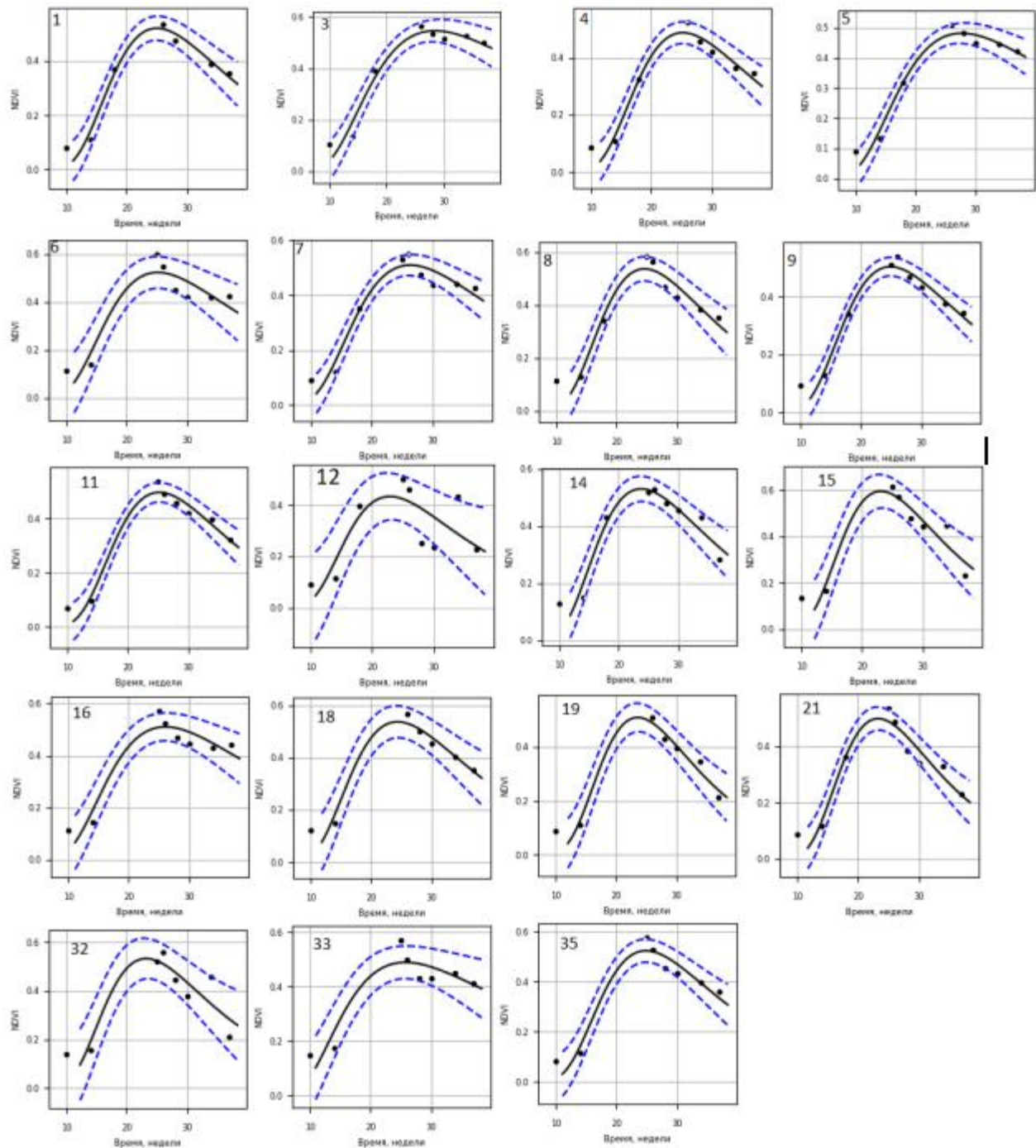
Химический состав почв мониторинговых площадок (по материалам Бакунович Н.О., Хохлова О.С., Мякшина Т.Н., Русаков А.В., Шаповалов А.С. Загрязнение тяжелыми металлами и дыхательная активность микроорганизмов в нативных почвах и искусственных субстратах (на примере заповедного участка “Ямская степь”) Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2016. № 85. С. 131-149.)

Название н.п.	№ МП	Li	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Zr	Mo	Cd	Sn	Sb	Cs	Ba	Pb
Романово	H1	26.0	110.0	57.0	9.5	32.0	25.0	67.0	6.7	100.0	180.0	1.10	0.36	3.60	2.30	4.0	390.0	24.0
Сенное	H3	27.0	110.0	54.0	9.5	29.0	18.0	57.0	7.1	91.0	160.0	1.00	0.27	2.50	0.63	4.1	340.0	21.0
Галичи	H4	29.0	120.0	55.0	11.0	31.0	18.0	63.0	5.7	110.0	160.0	0.85	0.25	2.50	0.54	4.4	360.0	23.0
Кленовенькое	H5	21.0	120.0	56.0	12.0	32.0	19.0	75.0	7.1	150.0	160.0	1.40	0.33	2.30	0.55	4.2	360.0	24.0
Должник	H6	26.0	110.0	50.0	11.0	30.0	20.0	74.0	6.4	100.0	180.0	0.93	0.71	12.00	1.90	3.8	400.0	30.0
Барское	H7	22.0	110.0	51.0	12.0	31.0	31.0	80.0	4.6	110.0	210.0	1.10	0.58	5.50	0.85	3.6	440.0	27.0
Водяное	H8	35.0	130.0	59.0	11.0	37.0	21.0	97.0	7.6	93.0	170.0	0.93	0.29	3.50	0.73	4.6	380.0	24.0
Хмелеватое	H9	27.0	110.0	53.0	9.2	28.0	17.0	54.0	5.7	91.0	180.0	0.78	0.25	2.50	0.57	3.7	350.0	22.0
Днище Суры	H11	18.0	63.0	71.0	8.3	26.0	26.0	78.0	4.9	110.0	140.0	1.70	0.41	1.90	0.67	3.3	320.0	18.0
Ямская плакор																		
косимая	H12	26.0	90.0	42.0	8.8	25.0	18.0	47.0	5.1	68.0	110.0	0.81	0.40	2.60	0.54	3.7	310.0	22.0
некосимая	H13	22.0	90.0	46.0	8.7	25.0	17.0	45.0	5.8	68.0	110.0	0.81	0.32	2.30	0.54	3.5	300.0	21.0
Осинник	H14	27.0	120.0	54.0	13.0	34.0	20.0	57.0	6.1	110.0	170.0	1.20	0.36	2.70	0.59	4.3	410.0	26.0
Резников Яр	H15	24.0	110.0	55.0	13.0	35.0	25.0	85.0	6.2	170.0	200.0	0.95	0.54	6.40	1.90	4.1	420.0	28.0
Косино	H16	22.0	110.0	53.0	13.0	32.0	22.0	61.0	6.0	110.0	210.0	0.97	0.34	2.30	0.57	3.7	420.0	24.0
Воробьево	H18	29.0	120.0	55.0	11.0	36.0	21.0	63.0	8.4	92.0	140.0	0.93	0.29	2.60	0.66	4.4	330.0	22.0
Вислое	H19	29.0	120.0	57.0	12.0	34.0	19.0	58.0	7.6	100.0	180.0	0.86	0.29	2.50	0.61	4.3	400.0	24.0
Еремкин лог	H21	21.0	89.0	94.0	11.0	38.0	34.0	73.0	7.8	110.0	230.0	3.00	0.29	2.50	0.68	3.9	390.0	20.0

Сезонная динамика NDVI на площадках мониторинга в заповеднике Ямская степь в 2015

Цифра в верхнем левом углу - код участка, точки – эксперимент, линия – по уравнению роста, пунктир – доверительный интервал.





Сезонная динамика NDVI на площадках мониторинга в заповеднике Ямская степь в 2016

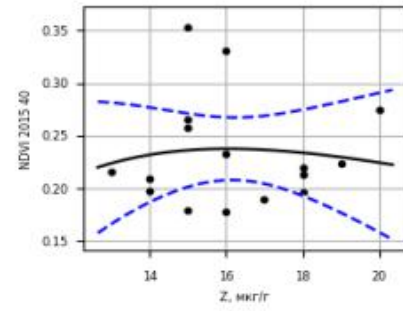
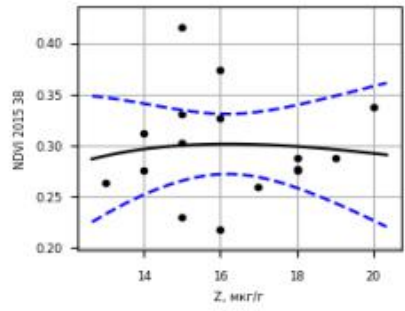
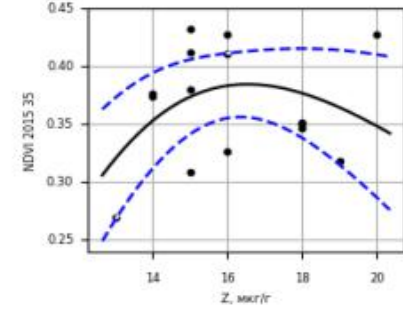
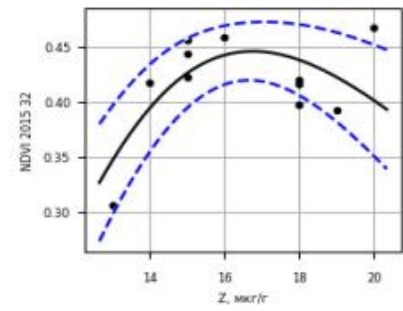
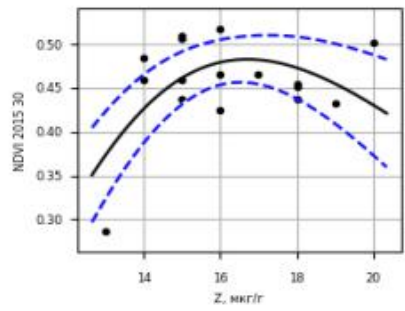
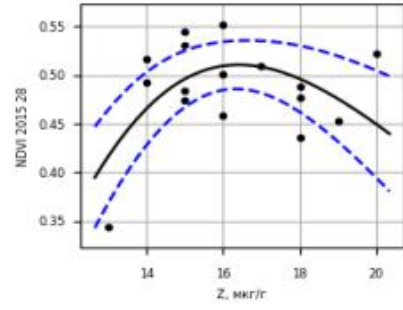
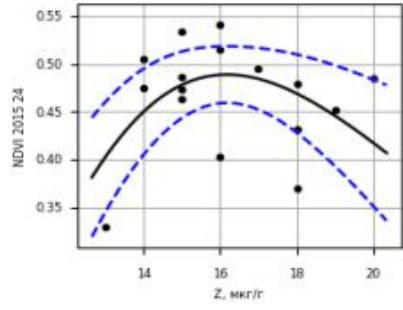
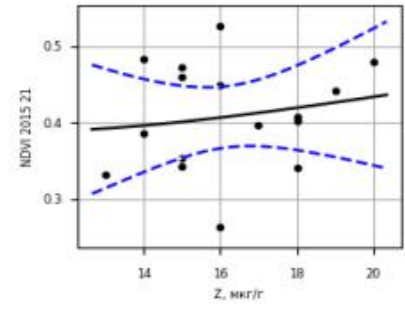
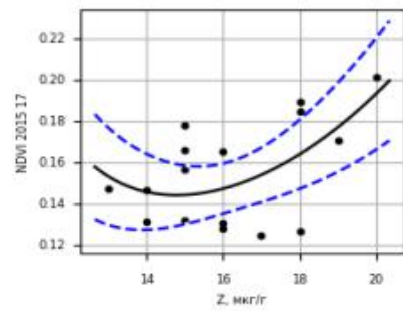
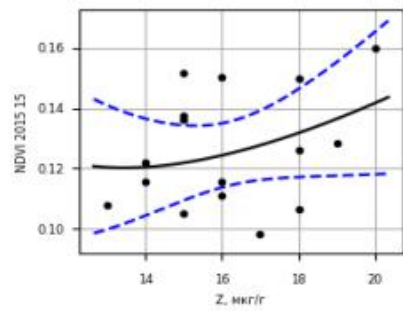
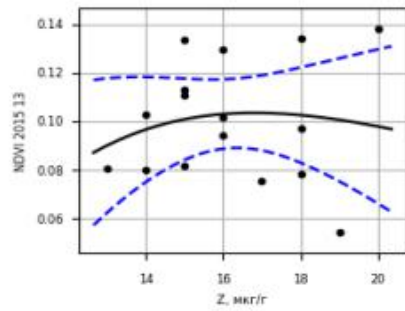
Цифра в верхнем левом углу - код участка, точки – эксперимент, линия – по уравнению роста, пунктир – доверительный интервал.

Коэффициенты уравнения сезонной динамики NDVI на мониторинговых площадках в заповеднике Ямская степь в 2015 г. и особые точки.

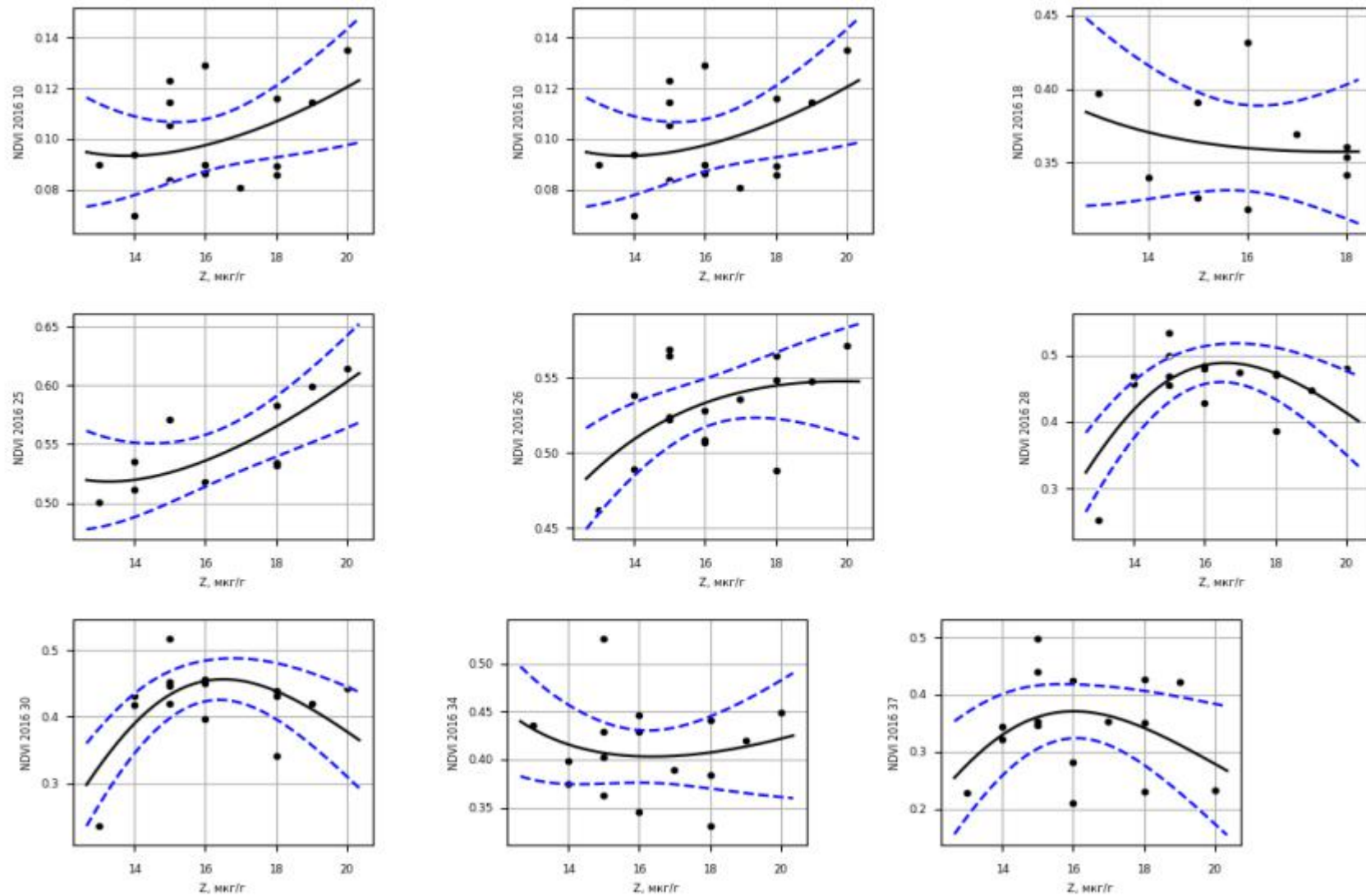
Площадка	λ	B	k	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6
1	4,4558E+20	11,3	294,21	15	19	23	26	33	40
3	1,13383E+12	6,6	178,98	13	17	23	27	37	46
4	1,43262E+20	11,1	287,77	15	19	23	26	33	40
5	1,21225E+13	7,2	193,96	13	18	23	27	37	45
6	1,26601E+15	8,4	214,14	13	17	22	26	34	41
7	1,72088E+14	7,9	203,57	13	17	22	26	34	42
8	8,40699E+13	7,7	197,22	13	17	22	25	34	42
9	2,22861E+17	9,5	249,76	14	18	23	26	34	42
11	2,88441E+17	9,6	247,36	14	18	23	26	34	41
12	10300488106	5,7	148,39	12	16	21	26	36	46
14	5,98236E+15	8,7	222,78	13	17	22	26	34	41
15	1,3584E+12	6,7	174,69	12	17	22	26	35	44
16	2,39318E+14	7,9	206,95	13	17	22	26	35	43
18	6,54977E+11	6,5	173,02	12	17	22	26	36	45
19	5,89194E+18	10,3	274,31	15	19	24	27	35	42
21	1,36096E+15	8,3	224,30	14	18	23	27	36	44
32	25598603871	5,7	154,57	12	17	22	27	37	47
33	48121697048	6,0	154,83	12	16	21	26	36	45
35	9,40488E+19	11,0	281,19	14	18	23	26	33	39

Коэффициенты уравнения сезонной динамики NDVI на мониторинговых площадках в заповеднике Ямская степь в 2016 г. и особые точки.

Площадка	λ	B	k	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6
1	1,73198E+11	6,3	157,25	12	16	21	25	34	43
3	783228,5986	3,3	92,73	10	15	20	28	42	55
4	1,91265E+11	6,3	159,24	12	16	21	25	35	43
5	5212185,434	3,7	103,89	10	15	21	28	40	52
6	612941042,9	4,9	124,24	11	15	20	25	35	45
7	255097067,1	4,7	123,46	11	15	21	26	37	48
8	2,81212E+12	7,0	171,73	12	16	21	25	33	41
9	1,23954E+11	6,2	154,99	11	16	21	25	34	43
11	1,95226E+12	6,9	173,00	12	16	21	25	34	42
12	27963592219	6,0	137,98	10	14	19	23	32	40
14	18487714512	5,8	138,58	11	15	19	24	33	41
15	2,67229E+13	7,6	175,44	11	15	20	23	31	38
16	23406329,78	4,1	107,91	10	15	20	26	38	48
18	19633438029	5,8	141,48	11	15	20	24	34	42
19	2,01856E+15	8,6	203,79	12	16	20	24	31	38
21	1,26256E+15	8,6	199,09	12	16	20	23	31	38
32	7,36107E+11	6,7	156,61	11	15	19	23	32	39
33	325369,0877	3,2	81,31	9	13	18	26	38	50
35	4,49143E+11	6,5	162,19	12	16	21	25	34	42



Отклик NDVI на концентрацию тяжёлых металлов (z) в почве в 2015 г. Календарная дата (в неделях) указана на ординате. Точки соответствуют мониторинговым площадкам в заповеднике Ямская степь. Сплошная линия – дозовая зависимость, пунктир – доверительный интервал.



Отклик NDVI на концентрацию тяжёлых металлов (z) в почве в 2016 г. Календарная дата (в неделях) указана на ординате. Точки соответствуют мониторинговым площадкам в заповеднике Ямская степь. Сплошная линия – дозовая зависимость, пунктир – доверительный интервал.

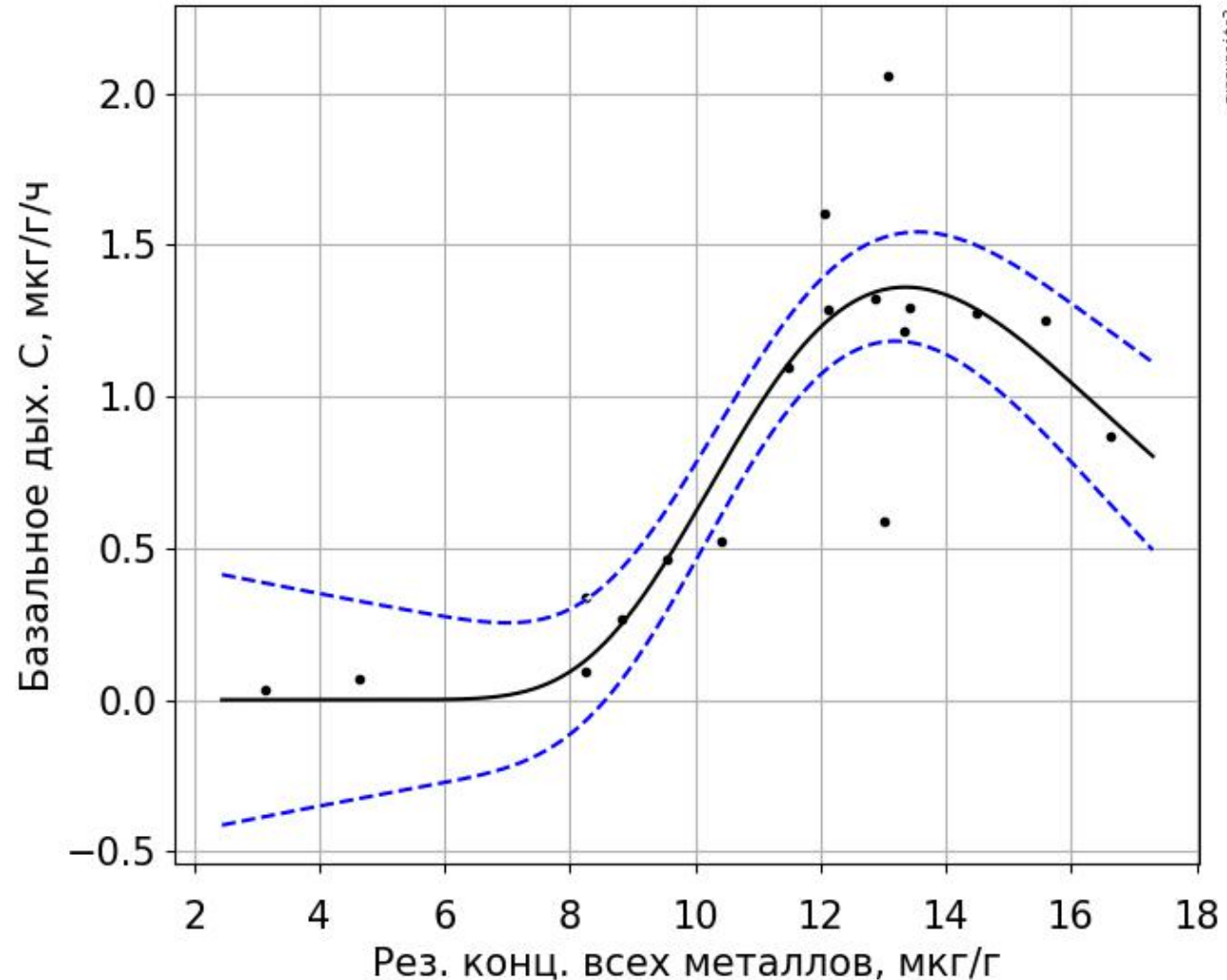
Коэффициенты уравнения отклика NDVI на концентрацию тяжёлых металлов (z) в почве в 2015 и 2016 г. г. на мониторинговых площадках в заповеднике Ямская степь и особые точки.

Год	Неделя	Λ	B	K	q_4/z_4	z_1	z_2	z_3	z_4	z_5	z_6
2015	13	278218,1	4	65	0,01	6,3	9,2	12,5	16,8	24,4	31,6
2015	24	1,18E+12	8	122	0,03	8,0	10,6	13,8	16,2	21,7	26,8
2015	28	1,37E+11	7	114	0,03	7,9	10,6	13,8	16,4	22,2	27,6
2015	30	1,31E+12	8	125	0,03	8,3	11,0	14,2	16,7	22,4	27,6
2015	32	3,25E+11	7	120	0,03	8,2	10,9	14,1	16,8	22,6	28,0
2015	35	1,71E+09	6	97	0,02	7,4	10,2	13,5	16,5	22,9	28,7
2015	38	86,21018	1	24	0,02	3,4	5,9	8,7	16,2	26,5	36,5
2015	40	3177,799	3	40	0,01	4,8	7,5	10,6	16,0	24,6	32,8
2016	26	36,84956	1	21	0,03	3,3	6,0	9,0	19,9	33,7	47,7
2016	28	2,96E+16	10	168	0,03	9,1	11,6	14,7	16,6	21,6	26,1
2016	30	5,96E+17	11	181	0,03	9,3	11,7	14,7	16,5	21,3	25,4
2016	37	9,59E+19	12	200	0,02	9,3	11,7	14,5	16,0	20,4	24,2

Зависимость базального дыхания от концентрации металлов в почве

(по материалам Бакунович Н.О., Хохлова О.С., Мякшина Т.Н., Русаков А.В., Шаповалов А.С. Загрязнение тяжелыми металлами и дыхательная активность микроорганизмов в нативных почвах и искусственных субстратах (на примере заповедного участка "Ямская степь") Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2016. № 85. С. 131-149.)

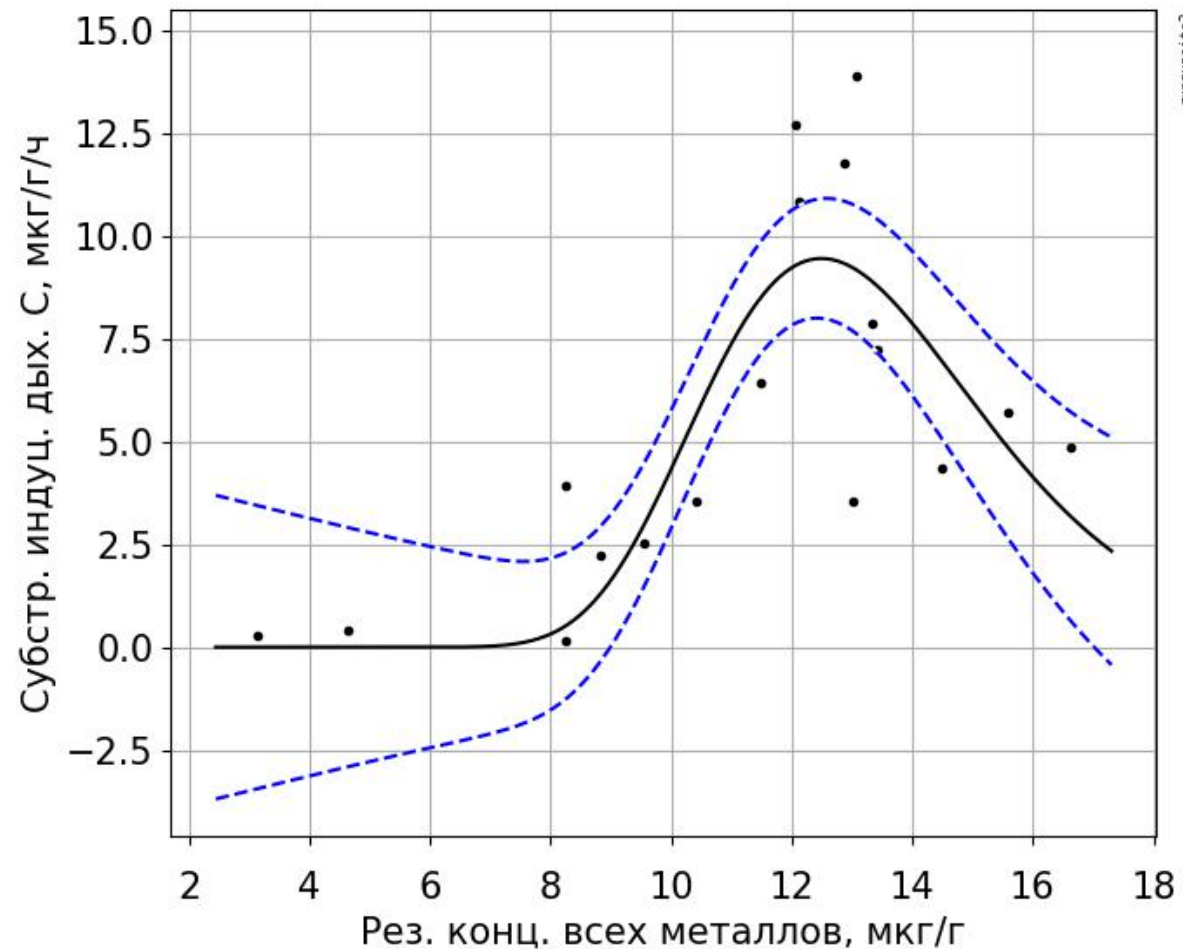
Базальное дых. С, мкг/г/ч vs. Рез. конц. всех металлов, мкг/г with 95% confidence intervals



Зависимость субстрат-индуцированного дыхания от концентрации металлов в почве

(по материалам Бакунович Н.О., Хохлова О.С., Мякшина Т.Н., Русаков А.В., Шаповалов А.С. Загрязнение тяжелыми металлами и дыхательная активность микроорганизмов в нативных почвах и искусственных субстратах (на примере заповедного участка “Ямская степь”) Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2016. № 85. С. 131-149.)

Субстр. индуц. дых. С, мкг/г/ч vs. Рез. конц. всех металлов, мкг/г with 95% confidence intervals



Выводы

1. Сезонная динамика вегетационного индекса NDVI на всех участках мониторинга в окрестностях участка «Ямская степь» заповедника «Белогорье» подчиняется законам сохранения механики и макроскопической кинетики биологических реагирующих систем.
2. Сезонная динамика вегетационного индекса NDVI каждого пиксела характеризуется индивидуальным, отличающим его от других пикселов, набором значений параметров макроскопической кинетики: тремя константами уравнения роста и шестью особыми точками.
3. Шесть особых точек уравнения роста делят сезонную кривую вегетационного индекса NDVI на семь фаз, для каждой из которых характерно индивидуальное сочетание значений параметров макроскопической кинетики.
4. Для фиксированного момента сезона роста показатель биомассы растительного покрова (в форме NDVI) для совокупности пикселов с одинаковыми, помимо загрязнения, условиями роста в ответ на возрастающую результирующую концентрацию ведущих компонентов субстрата в фазовой плоскости доза-ответ сначала закономерно растет, достигая максимума, а затем убывает, в целом следуя уравнению отклика на воздействие.
5. Закономерный нелинейный отклик на усиливающееся химическое воздействие позволяет выявить оптимальную (пороговую) величину концентрации токсикантов в почве и ранжировать почвы по содержанию загрязняющих веществ на основе особых точек модели, разделяющих макроскопические фазы отклика растительности на воздействие комплекса стрессоров.
6. Результирующая концентрация химических элементов (стрессоров) в почве для целей биотестирования представляет собой среднее геометрическое из их индивидуальных концентраций по материалам химического анализа.

Литература:

The macroscopic kinetics of temporal and spatial variability of the ndvi in yamskaya steppe reserve under conditions of soil contamination with heavy metals / G. P. Glazunov, V. M. Gendugov, M. V. Evdokimova et al. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2019. — Vol. 16, no. 2. — P. 111–127. [DOI]