

SENTINEL 1 DATA CORRELATION WITH GROUND MEASUREMENTS OF SOIL TEMPERATURE

Rodionova N.V.

Institute of Radioengineering and Electronics, Russian Academy of Sciences,
Fryazino, Russia

Abstract

The goal of this study is to analyze interactions between Sentinel-1 radar images and soil temperature resulting from *in situ* field data. Ground-based measurements of temperature and soil moisture for nine stations in Finland, Poland, France and Germany for the period 2014-2016 are available on the website of the International soil moisture network. Results indicated the correlation between backscatter coefficient and soil temperature for six stations. The regression relationships between the backscatter coefficient and soil temperature was constructed in the case of high correlation. The influence of vegetation and soil texture on the correlation coefficient was examined.

Keywords: C-band radar data, polarization, soil temperature, backscattering coefficient, Spearman's correlation coefficient

СВЯЗЬ РАДАРНЫХ ДАННЫХ SENTINEL-1 С НАЗЕМНЫМИ ИЗМЕРЕНИЯМИ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОЧВЫ

Родионова Н.В.

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино

В работе исследуется связь радарных данных Sentinel 1 с температурой почвы, измеренной на девяти наземных станциях, находящихся на территории Финляндии, Польши, Франции и Германии за период 2014-2016 годов. Показано наличие корреляции коэффициента обратного рассеяния с температурой почвы на глубине 5, 10, 20 и 30 см для 6 из 9 станций наземных измерений. Для случая сильной связи между переменными построены регрессионные соотношения, связывающие коэффициент обратного рассеяния с температурой почвы. Рассмотрено влияние надпочвенной растительности и текстуры почвы на коэффициент корреляции.

Ключевые слова: радарные данные, С-диапазон, поляризация, температура почвы, коэффициент обратного рассеяния, коэффициент корреляции Спирмена

Введение. В данной работе рассмотрена корреляционная связь между коэффициентом обратного рассеяния (КОР) и параметрами почвы для девяти станций на территории Европы (Финляндия, Польша, Франция, Германия) с различной текстурой почв от почв хвойных бореальных лесов (Финляндия) до торфяных болотистых почв в Польше и почв, покрытых травой или с/х культурами во Франции и Германии, на основе имеющихся в открытом доступе на сайте International soil moisture network (<https://ismn.geo.tuwien.ac.at>) наземных измерений температуры и влажности почвы на глубинах от 5 до 30 см и находящихся в открытом доступе радарных данных Sentinel 1 С-диапазона VV+VH поляризации.

В работе [1] была установлена эмпирическая зависимость между коэффициентом обратного рассеяния и температурой почвы на глубине 5 см. Измерения проводились с помощью космического аппарата RADARSAT-1 в С-диапазоне для НН поляризации для сельскохозяйственных полей в Канаде. Полученные авторами [1] регрессионные соотношения между КОР и наземными измерениями температуры почвы на глубине 5 см показали положительную корреляцию между этими величинами с разными коэффициентами детерминации в зависимости от текстуры почвы. Наименьший коэффициент детерминации $0,2 \div 0,35$ был для суглинистых почв.

Выяснение вопроса о наличии корреляции между радарными данными и наземными измерениями параметров почвы (температуры и влажности) является важным шагом к созданию эмпирической модели для дистанционного определения параметров почвы.

Наземные данные. В работе использовались наземные измерения параметров почвы (температуры и влажности на глубинах 5, 10, 20 и 30 см) и температуры воздуха, находящиеся в открытом доступе на сайте International soil moisture network. Были выбраны 9 станций на территории Западной Европы, для которых период проведения наземных измерений совпадал с имеющейся на тот же период времени радарной информацией Sentinel 1 (S1). Информация о наземных станциях, включенных в обработку, дана в табл. 1.

Высокоширотная станция SOD103 в Финляндии имеет почвы бореальных хвойных лесов с высоким содержанием глины и органики. Для почв станции Biebrza-S-1, soil-8 в Польше (болотные торфяники) характерна очень высокая влажность, почти в 2 раза превышающая влажность почв для других рассмотренных станций. Для станций во Франции и Германии наибольшим отличием в текстуре почвы является очень малое содержание органики, а также меньшее содержание глины и большее содержание песка в сравнении с почвами на станциях SOD103 и Biebrza.

Радарные данные Sentinel 1. В работе использовались находящиеся в открытом доступе Sentinel 1 радарные данные С-диапазона IW (interferometric wide swath) моды с поляризациями (VV+VH) и пространственным разрешением 20 м. Работа с изображениями S1 осуществлялась

с помощью программы S1Toolbox и позднее SNAP (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/toolboxes/sentinel-1>). Предварительная обработка данных включала в себя выделение фрагмента с исследуемой областью и радиометрическую калибровку. В табл. 2 приведены данные для каждой станции по числу обработанных сеансов съемки S1, углу обзора, периоду съемки и количеству точек при усреднении КОР по профилю.

Коэффициент корреляции Спирмена между КОР и наземными измерениями температуры почвы. Для определения связи между коэффициентом обратного рассеяния и наземными измерениями температуры почвы был подсчитан коэффициент корреляции Спирмена ρ_s между этими переменными. В табл. 3 приведены значения ρ_s и р-значения для девяти наземных станций и двух поляризации (значения, выделенные полужирным шрифтом, указывают на наличие корреляции; пустые ячейки соответствуют отсутствию наземных данных).

Таблица 1. Информация о наземных станциях, включенных в обработку.

Название станции	Широта (с.ш.), град	Долгота (в.д.), град	Тип растительности	Текстура почвы на глубине 0-30 см, %
SOD103, (Финляндия)	67,35917	26,68594	Хвойные деревья, вечнозеленые,	глина-40, органика-33,6, песок-20, ил (silt) -40.
Biebrza-S-1, -soil-8, (Польша)	53,6328	22,97976	трава	глина- 32, органика- 39,4, песок-35, ил - 33.
Mejannes-le-Clap, (Франция)	44,222	4,34483	трава	глина- 24, органика- 1,61, песок-42, ил - 34.
SMOSMANIA CabrieresAvignon, (Франция)	43,88367	5,16483	сельхозугодья, неорошаемые	глина- 19, органика- 2,13, песок-37, ил - 44.
Villevielle, (Франция)	43,79517	4,09083	сельхозугодья, неорошаемые/ деревья или кусты	глина- 19, органика- 2,13, песок-37, ил - 44.
Gevenich, (Германия)	50,9892	6,32355	сельхозугодья, неорошаемые	глина- 22, органика- 0,74, песок-41, ил - 37.
Merzenhausen, (Германия)	50,9303	6,29747	сельхозугодья, неорошаемые	глина- 22, органика- 0,74, песок-41, ил - 37.
Selhausen, (Германия)	50,8691	6,44954	сельхозугодья, неорошаемые	глина- 23, органика- 1,07, песок-37, ил - 40.
Schoeneseiffen, (Германия)	50,5149	6,37559	трава	глина- 20, органика- 1,45, песок-42, ил - 38.

Таблица 2. данные для каждой станции.

Название станции	Количество обработанных сеансов съемки S1	Угол обзора	Период съемки	Количество точек в профиле
SOD103	28	37,5 ⁰	16.10.15 – 10.10.16	30
Biebrza-S-1, -soil-8,	29	38 ⁰	26.4.15 – 7.6.16	25
Mejannes-le-Clap,	17	42 ⁰	15.10.14 – 23.8.15	30
CabrieresAvignon,	23	45 ⁰	3.10.14 – 27.12.15	35
Villevielle	20	40 ⁰	6.2.15 – 27.12.15	20
Gevenich	60	40 ⁰	16.11.14 – 16.01.17	~10
Merzenhausen	61	40 ⁰	16.11.14 – 28.01.17	~10
Selhausen	54	40 ⁰	16.11.14 – 24.10.16	~12
Schoeneseiffen	38	40 ⁰	16.11.14 – 24.10.16	~10

Таблица 3.1. Коэффициент корреляции Спирмена ρ_S между КОР и наземными измерениями температуры почвы на станциях в Польше, Финляндии и Франции.

	SOD103	Biebrza	CabrieresAvignon	Mejannes-le-Clap	Villevielle
T⁰, почва 5 см					
σ_{VV}^0	$\rho_S = 0,13,$ $p = 0,5$	$\rho_S = 0,1,$ $p = 0,6$	$\rho_S = 0,5,$ $p = 0,01$	$\rho_S = 0,9,$ $p = 10^{-7}$	$\rho_S = 0,55,$ $p = 0,01$
σ_{VH}^0	$\rho_S = 0,55,$ $p = 0,002$	$\rho_S = 0,3,$ $p = 0,1$	$\rho_S = 0,48,$ $p = 0,02$	$\rho_S = 0,8,$ $p = 10^{-4}$	$\rho_S = 0,07,$ $p = 0,8$
T⁰, почва 10 см					
σ_{VV}^0	$\rho_S = 0,19,$ $p = 0,33$	$\rho_S = 0,02,$ $p = 0,9$	$\rho_S = 0,5$ $p = 0,01$	$\rho_S = 0,91$ $p = 10^{-7}$	$\rho_S = 0,56$ $p = 0,01$
σ_{VH}^0	$\rho_S = 0,57,$ $p = 0,0016$	$\rho_S = 0,23,$ $p = 0,2$	$\rho_S = 0,45$ $p = 0,03$	$\rho_S = 0,79$ $p = 10^{-4}$	$\rho_S = 0,08$ $p = 0,8$
T⁰, почва 20 см					
σ_{VV}^0		$\rho_S = -0,02,$ $p = 0,9$	$\rho_S = 0,51$ $p = 0,01$	$\rho_S = 0,88$ $p = 10^{-6}$	$\rho_S = 0,52$ $p = 0,02$
σ_{VH}^0		$\rho_S = 0,17,$ $p = 0,4$	$\rho_S = 0,46$ $p = 0,02$	$\rho_S = 0,76$ $p = 10^{-4}$	$\rho_S = 0,09$ $p = 0,7$
T⁰, почва 30 см					
σ_{VV}^0			$\rho_S = 0,52$ $p = 0,01$	$\rho_S = 0,85$ $p = 10^{-5}$	$\rho_S = 0,53$ $p = 0,02$
σ_{VH}^0			$\rho_S = 0,46$ $p = 0,03$	$\rho_S = 0,74$ $p = 0,0007$	$\rho_S = 0,1$ $p = 0,7$

Таблица 3.2. Коэффициент корреляции Спирмена ρ_S между КОР и наземными измерениями температуры почвы на станциях в Германии.

	Gevenich	Merzenhausen	Selhausen	Schoeneseiffen
T⁰, почва 5 см				
σ_{VV}^0	$\rho_S = -0,53$ $p = 6 \cdot 10^{-6}$	$\rho_S = -0,28$ $p = 0,013$	$\rho_S = -0,24$ $p = 0,04$	$\rho_S = -0,27$ $p = 0,05$
σ_{VH}^0	$\rho_S = -0,2$ $p = 0,07$	$\rho_S = -0,06$ $p = 0,32$	$\rho_S = -0,18$ $p = 0,1$	$\rho_S = 0,38$ $p = 0,01$
T⁰, почва 20 см				
σ_{VV}^0	$\rho_S = -0,5$ $p = 2 \cdot 10^{-5}$	$\rho_S = -0,21$ $p = 0,06$	$\rho_S = -0,18$ $p = 0,1$	$\rho_S = -0,26$ $p = 0,06$
σ_{VH}^0	$\rho_S = -0,16$ $p = 0,11$	$\rho_S = 0,001$ $p = 0,5$	$\rho_S = -0,12$ $p = 0,2$	$\rho_S = 0,44$ $p = 0,003$

Как следует из табл. 3, только для одной из девяти станций, а, именно, станции Mejannes-le-Clap (Франция), значение коэффициента корреляции Спирмена ρ_S свидетельствует о сильной положительной связи σ^0 и T^0 почвы для глубины от 5 до 30 см, а значение уровня p говорит о высокой статистической значимости связи между переменными. Данный результат получен для обеих поляризации. Умеренная положительная корреляция между КОР и T^0 почвы

наблюдается для станций CabrieresAvignon (Франция) для обеих поляризаций, станции Villeveielle (Франция) для согласованной поляризации, станции SOD103 (Финляндия) и станции Schoeneseiffen (Германия) для кросс-поляризации. Умеренная отрицательная корреляция между переменными для глубины почвы 5 и 20 см получена для станции Gevenich (Германия) для согласованной поляризации. Для трех остальных станций (Merzenhausen и Selhausen – Германия) и Biebrza (Польша)) корреляция слабая или совсем отсутствует.

На основе приведенных в Таблице 3 значений ρ_s можно сделать следующие выводы:

- показано наличие как положительной, так и отрицательной корреляции ($p < 0,05$) коэффициента обратного рассеяния с температурой почвы для 6 из 9 станций наземных измерений параметров почвы;
- для двух станций есть корреляция между переменными для обеих поляризаций, для четырех станций – для одной из поляризаций;
- показано, что для станции SOD103 (хвойный лес) есть положительная корреляция между КОР и T^0 почвы только для кросс-поляризации.

При наличии сильной связи между переменными можно построить регрессионные соотношения, связывающие коэффициент обратного рассеяния с температурой почвы. В данном случае это сделано для станции Mejanne-le-Clap. Регрессионные соотношения представляют собой линейную зависимость между переменной $x = \sigma^0$ [дБ] и переменной $y = T^0$ – температурой почвы (рис. 1).

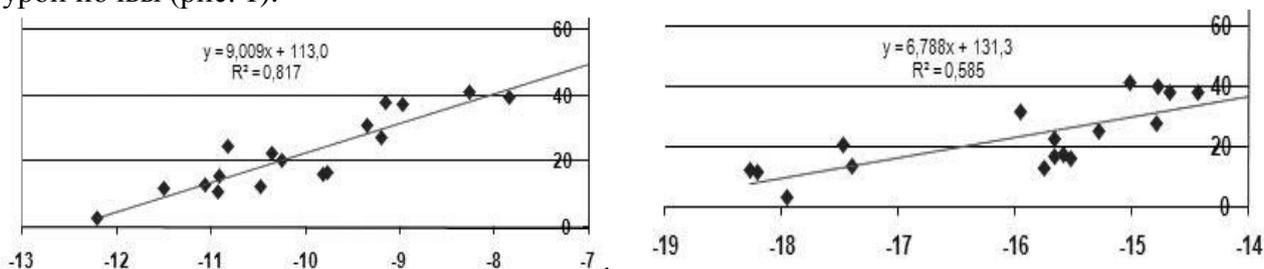


Рис. 1. Регрессионные соотношения между σ_{VV}^0 [дБ] (слева) и σ_{VH}^0 [дБ] (справа) и температурой почвы на глубине 5 см для станции Mejanne-le-Clap.

Коэффициент детерминации $R_{расч}^2$ составляет для данных регрессий 0,817 для согласованной поляризации и 0,585 для кросс- поляризации. Таблица для тестирования на уровне значимости 5% в случае выборки $N=17$ (количество сеансов съемки) и числа переменных $k=2$ дает критическое значение $R_{крит}^2 = 0,349$. Поскольку для обоих уравнений выполняется соотношение $R_{расч}^2 > R_{крит}^2$, то с вероятностью 95% можно утверждать о наличии значимости уравнений регрессии:

$$T_{почва5см}^0 = 9,009 * \sigma_{VV}^{дБ} + 113,0$$

$$T_{почва5см}^0 = 6,788 * \sigma_{VH}^{дБ} + 131,3$$

Вычисления показали, что при умеренном уровне связи между переменными значимость уравнений регрессии отсутствует.

Влияние текстуры почвы на связь обратного рассеяния с температурой почвы. В наиболее часто используемых моделях восстановления влажности почвы в дистанционном зондировании в С- диапазоне, например, в модели Wang- Schmugge [2], модели Hallikainen [3], используются данные о механическом составе почвы, а именно, содержании песка и глины. Именно эти две компоненты почвы, а также гумус [4] определяют количество свободной и связанной воды в почве, отсюда и ее диэлектрическую проницаемость, зависящую от температуры воды.

Текстура почвы влияет на σ_{soil}^0 из-за изменений в диэлектрических свойствах почвы через влагоемкость текстурных составляющих почвы. Jackson и Schmuege [5] нашли, что молекулы воды поглощаются частицами почвы и эффективно лишают подвижности (связывают) их диполи, препятствуя связанной воде взаимодействовать с сигналом радара. В С-диапазоне уменьшение содержания глины в почве приводит к увеличению чувствительности сигнала радара к влажности почвы [6], что связано с большим количеством свободной воды. Песчаные почвы содержат более высокое количество свободной воды, чем глинистая почва [7]. Таким образом, коэффициент корреляции Спирмена между σ^0 и влажностью почвы выше для песчаных почв [8]. Для станции Mejjannes-le-Clap (Франция) с высокой корреляцией между спутниковыми и наземными данными для обеих поляризаций отмечаем наибольшее процентное содержание песка в почве и наименьшее органики.

Влияние надпочвенной растительности на связь КОР с температурой почвы. Обратное рассеяние от поверхности почвы, покрытой растительностью, в соответствии с моделью водяного облака (Water Cloud Model- WCM) [9] представляется следующей формулой:

$$\sigma^0 = \sigma_{veg}^0 + \sigma_{veg+soil}^0 + \tau^2 \cdot \sigma_{soil}^0, \quad (1)$$

где σ_{veg}^0 , $\sigma_{veg+soil}^0$ и $\tau^2 \cdot \sigma_{soil}^0$ являются, соответственно, радарным обратным рассеянием, вызванным только растительностью (объемное рассеяние), многократным взаимодействием, включающим как растительность, так и почву, и рассеяние от голой почвы, ослабленное слоем растительности (поверхностное рассеяние); τ^2 - двунаправленный удельный коэффициент пропускания растительностью, ослабляющий микроволны, когда они дважды проходят через растительный покров. Членом $\sigma_{veg+soil}^0$ в (1) можно пренебречь в случае слабого переотражения между растительностью и почвой (для станций в Польше, Франции и Германии).

Значение σ_{veg}^0 можно определить из соотношения [9]:

$$\sigma_{veg}^0 = A \cdot w_c \cdot \cos \theta \cdot (1 - \tau^2), \quad \tau^2 = \exp(-2 \cdot B \cdot w_c \cdot \sec \theta) \quad (2)$$

где A и B – эмпирические параметры, зависящие от геометрической структуры растительного покрова, а также поляризации и длины волны сенсора; w_c - VWC- vegetation water content; θ - угол обзора.

Для оценки значения w_c была использована эмпирическая зависимость между деполаризационным отношением $\sigma_{VH}^0 / \sigma_{VV}^0$ и w_c , полученная для с/х культуры 'соя' в работе [10] в случае С-диапазона длин волн. Оценка параметров A и B сделана на основе данных статьи [11]. В результате расчеты показали, что учет влияния растительности на σ_{soil}^0 по формулам (1)-(2) не привел к увеличению коэффициента корреляции Спирмена между σ_{soil}^0 и наземными измерениями температуры почвы (для станций во Франции, Польше и Германии). Для станции SOD103 (Финляндия) в уравнении (1) необходим учет всех трех слагаемых. Влияние почвы на КОР уменьшено в данном случае из-за объемного рассеяния лесным покровом, определяемое кросс- поляризацией, и переотражения ствол - подстилающая поверхность. Последнее можно оценить только при наличии радарных данных с полной поляризацией, чего нет у S1 данных. Однако в ряде работ отмечается, что для хвойных лесов большая часть обратного рассеяния приходит именно от поверхности земли [12], и состояние влажности подстилающей поверхности имеет главное влияние на временной ход радарного отклика от леса, несмотря на затухание радарного сигнала при прохождении через лесной покров [13].

Следует отметить, что не только текстура почвы и надпочвенная растительность влияют на связь между радарными и наземными данными. Так для станции Mejjannes-le-Clap (Франция) получена высокая корреляция между спутниковыми и наземными данными для обеих

поляризаций, тогда как для станций в Германии практически с той же текстурой почвы и схожей надпочвенной растительностью корреляция или умеренная, или слабая или просто отсутствует. Для понимания, отчего так происходит, необходим учет и других параметров, к примеру, осадков; нужна конкретная информация о надпочвенной растительности, которая, к сожалению, отсутствуют в базе данных International soil moisture network.

Заключение. В работе исследуется связь радарных данных Sentinel 1 с температурой почвы на глубине от 5 до 30 см, измеренной на девяти наземных станциях, находящихся на территории Финляндии, Польши, Франции и Германии за период 2014-2016 годов. Наземные станции располагаются на широтах от 43° до 67° с.ш. и различаются почвами от почв хвойных бореальных лесов (Финляндия) до торфяных болотистых почв в Польше и почв, покрытых травой или с/х культурами, во Франции и Германии.

Показано наличие корреляции коэффициента обратного рассеяния с температурой почвы для 6 из 9 станций наземных измерений параметров почвы. В случае сильной связи между переменными (станция Mejanne-le-Clap) построены регрессионные соотношения, связывающие КОР и T^0 , при значении коэффициента детерминации для согласованной поляризации $R^2 \sim 0,8$ и кросс – поляризации $R^2 \sim 0,6$. Результаты свидетельствуют о влиянии текстуры почвы на коэффициент корреляции. Учет влияния надпочвенной растительности не привел к увеличению коэффициента корреляции между коэффициентом обратного рассеяния и температурой почвы.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Khaldoune J., van Bochove E., Bernier M., Nolin M.C. An approach for mapping frozen soil of agricultural land under snow cover using RADARSAT-1 and RADARSAT-2// IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceeding. 2008. 3. P.III-382-III-385.
- [2] Wang J.R. and Schmugge T.J. An empirical model for the complex dielectric permittivity of soils as a function of water content// IEEE Trans. GRS. 1980. GE-18(4). P.288-295.
- [3] Hallikainen M. T., Ulaby F. T., Dobson M.C., El-Rayes M.A., and Wu L.-K. Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil-Part 1: Empirical Models and Experimental Observations// IEEE Trans. GRS. 1985. GE-23(1). P. 25-34.
- [4] Бобров П.П., Кондратьева О.В., Мустакова М.М. Влияние содержания органического вещества в почвах на диэлектрическую проницаемость в диапазоне частот 10 кГц -8,5 ГГц// Вестник СибГАУ. 2013. №5 (51). С. 95-97.
- [5] Jackson T.J. & Schmugge T.J. Passive microwave remote-sensing system for soil moisture. Some supporting research// IEEE Trans. GRS. 1989. 27. P.225-235. doi:10.1109/36.20301.
- [6] Ulaby F.T., Baltivala P.P. & Dobson M.C. Microwave backscatter dependence on surface roughness, soil moisture, and soil texture: Part 1 – bare soil//IEEE Trans. Geosc. Electronics. 1978. 16. P. 286-295. doi: 10.1109/TGE 1978.294586.
- [7] Srivastava H.S., Patel P., Navalgund R.R. How far SAR has fulfilled its expectation for soil moisture retrieval// SPIE Digital Library. 6410. 2006. Nov.13-17. Paper No. 64100. P.1-12.
- [8] Blumberg D.G., Freilikher V., Lyalko I.V., Vulfson L.D., Kotlyar A.L., Shevchenko V.N.& Ryabokononko A.D. Soil moisture (water-content) assessment by an airborne scatterometer// Remote Sensing of Environment. 2000. 71. P. 309-319. doi: 10.1016/S0034-4257(99)00087-5.
- [9] Attema E.P.W., Ulaby F.T. Vegetation modeled as a water cloud // Radio Sci. (USA). 1978. Vol. 13. P. 357-364.
- [10] De Roo R.D., Ulaby F.T., Dobson M.C. Using Microwave radar for soil moisture inversion under soybean canopies//Proc. of 1998 IGARSS Symp. 6-10 July 1998. Seattle. WA. USA. Part 1. P.94-96.
- [11] Gherboudj I., Magagi R., Berg A. A., Toth B. Soil moisture retrieval over agricultural fields from multi-polarized and multi-angular RADARSAT-2 SAR data// Remote Sensing of Environment. 2011. Vol. 115. P. 33-43.
- [12] Bourgeau-Chavez L. L., Kasischke E.S., Rutherford M. D. Evaluation of ERS SAR Data for Prediction of Fire Danger in a Boreal Region// Int. J. of Wildland Fire. 1999. 9(3). P. 183-194.
- [13] Rignot E., Way J.B., McDonald K., Vierck L., Williams C., Adams P., Payne C., Wood W., Shi J. Monitoring of Environmental Conditions in Taiga Forests Using ERS-1 SAR// Rem. Sens. Environ. 1994. 49. P. 145-154.