

Техногенный галогенез нефтезагрязнённых почв пойменных экосистем в условиях гумидного почвообразования и его экологические последствия

© 2021. М. В. Носова^{1,2}, аспирант, инженер,
В. П. Середина¹, д. б. н., профессор,

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет,
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д. 36,

²АО «ТомскНИПИнефть»,

634027, Россия, г. Томск, пр. Мира, д. 72,

e-mail: NosovaMV@tomsknipi.ru, seredina_v@mail.ru

В работе рассмотрены содержание легкорастворимых солей техногенного происхождения и закономерности их пространственного распределения в почвах нефтезагрязнённых пойменных экосистем Западной Сибири в пределах среднетаёжной подзоны (Томская область). Выявлены особенности процессов техногенного засоления (галогенеза), возникающих в результате эксплуатации технологических объектов нефтепромыслов (трубопроводного транспорта), несвойственных для условий гумидного почвообразования и заключающихся в появлении специфических соединений токсичных солей и признаков солончаковатости, приводящих к ухудшению плодородия почв и созданию условий, неблагоприятных для роста и развития растений. Сделан вывод о том, что обнаруженные изменения позволяют оценить экологическое состояние нефтезагрязнённых почв в районах, подверженных избыточному увлажнению (Западная Сибирь), как неудовлетворительное, и разработать комплекс научных рекомендаций по осуществлению биологического этапа рекультивации пойменных почв.

Ключевые слова: пойменные экосистемы, нефтяное загрязнение, легкорастворимые соли, техногенный галогенез.

Technogenic halogenesis of oil-contaminated soils of floodplain ecosystems under conditions of humid soil formation and its environmental consequences

© 2021. M. V. Nosova^{1,2} ORCID: 0000-0001-7985-6474
V. P. Seredina¹ ORCID: 0000-0002-7432-1726

¹National Research Tomsk State University,
36, Lenina St., Tomsk, Russia, 634050,

²Tomsk Research and Design Institute of Oil and Gas Joint Stock Company,
72, Mira St., Tomsk, Russia, 634027,

e-mail: NosovaMV@tomsknipi.ru, seredina_v@mail.ru

The content and patterns of spatial distribution of readily soluble salts of technogenic origin in the soils of oil-contaminated floodplain ecosystems of Western Siberia within the middle taiga subzone (Tomsk region) are considered. Peculiarities of technogenic salinization – halogenesis processes that arise as a result of the operation of oilfield technological facilities (field pipelines), are not typical for humid soil formation conditions and consist in the appearance of specific compounds of toxic salts and signs of soil salinization. It is revealed that salinization leads to deterioration of soil fertility and the creation of adverse conditions for the growth and development of plants. In the studied soils, technogenic salts are represented by compounds of the toxic salts NaCl, Na₂SO₄, MgCl₂. The maximum amount of salts is recorded in the upper horizons of soils. Soils have medium salinization (at the epicenter), and weak salinization (impact zone, pollution boundary) with a sulfate type of salinity according to cationic composition, sodium type – according to anionic. The detected changes make it possible to assess the ecological state of oil-contaminated soils in areas prone to excessive moisture (Western Siberia) as unsatisfactory, and to develop a set of scientific recommendations for the implementation of the biological stage of remediation of floodplain soils. One of the scientifically based methods may be the use of rolled biomats at the final stage of biological soil remediation. This material is able to retain seeds of oil-resistant herbs, which are usually washed out by the rain from the soil, by creating a plant layer that is mature in density and area, and also isolates plants from the negative effects of toxic salts formed as a result of pollution.

Keywords: floodplain ecosystems, oil pollution, readily soluble salts, technogenic halogenesis.

Совокупность взаимодействия технологических объектов и естественных природных сред приводит к формированию природно-техногенных систем (ПТС) на территории нефтегазовых месторождений. При формировании и эксплуатации ПТС элементарного уровня (линейные и площадные объекты) происходит их воздействие на природную среду. В соответствии с исследованиями многих учёных [1–6] техногенное воздействие нефтяного загрязнения на природные экосистемы связано с геохимическими и физическими нагрузками. Первым «барьером» и центром сосредоточения всех техногенных поллютантов являются почвы. Попадая в ландшафты, нефтяные углеводороды нарушают равновесие естественных процессов, происходящих в почвах, что приводит к изменению системы почвенных параметров [5–8].

Явление накопления легкорастворимых солей отмечено на территории нефтегазовых месторождений аридных областей Восточного Прикаспия [9] и Башкирии [10]. В почвах гумидного почвообразования процессы миграции солей в момент аварийных разливов нефти, а также их вторичное (посттехногенное) перераспределение практически не изучены. Особенно эти вопросы актуальны для почв пойменных экосистем, поскольку поймы рек являются геохимическим барьером для многих веществ и химических элементов, приносимых с поверхностным стоком и грунтовыми водами из элювиальных и трансэлювиальных ландшафтов.

Целью настоящего исследования является выявление особенностей техногенной трансформации почв пойменных экосистем и распределения легкорастворимых солей в условиях локального загрязнения нефтью и нефтепродуктами (НП), а также оценка экологических последствий данных изменений.

Объекты и методы исследования

Почвенно-экологическое обследование территории нефтегазовых месторождений осуществляли методом маршрутов и ключевых участков, также использовали сравнительно-географический и профильно-генетический методы анализа. Методика включала сопряжённый анализ фоновых и соответствующих им разностей загрязнённых почв. Для оценки закономерностей профильного и латерального распределения солей в загрязнённом почвенном пространстве закладывали опорные разрезы и прикопки. Выделены следующие

зоны техногенной нагрузки: эпицентр загрязнения, импактная зона воздействия, граница нефтяного пятна. Морфологическими индикаторами границ ореолов загрязнения являлись наличие или отсутствие на поверхности почв битуминозной корки и визуальные признаки угнетённости растительного покрова.

В качестве фона служила незагрязнённая аллювиальная луговая обычная грунтово-глеевая тяжелосуглинистая почва [11], формирующаяся в центральной части поймы. Нефтезагрязнённые почвы определяются как хемозёмы нефтезагрязнённые по аллювиальной серогумусовой типично-глееватой средне-мелкой почве. Для определения профильных характеристик почв образцы отбирали по основным генетическим горизонтам, для оценки особенностей латеральной миграции солей – методом конверта в соответствии с ГОСТ 28168-89. Для выявления механизмов миграции поллютантов (НП, легкорастворимых солей) использовали материалы полевых наблюдений по 2 почвенным разрезам (глубиной до 100 см) и 26 прикопкам (глубиной до 50 см). Нефтепродукты в почве определяли флуориметрическим методом на анализаторе жидкости «Флюорат-02». Аналитические исследования содержания и состава легкорастворимых солей выполняли в соответствии с ГОСТ 26423-85. Математическую обработку полученных данных производили с помощью пакета программ Statistica 6.0.

Результаты и обсуждение

Почвы центральной части поймы являются главным «пунктом сбора» всех поллютантов, так как они формируются в аккумулятивных позициях ландшафта [7], поэтому сброс соледержащих растворов на рельеф приводит к загрязнению почвенного покрова [12, 13]. Непосредственно после аварии нефть концентрируется в почвах вблизи места аварии – ядре ореола загрязнения (эпицентр). При движении потоков к краевым зонам (импактная зона и граница) интенсивность загрязнения поллютантами уменьшается как в латеральном направлении, так и в глубину по профилю почвы (рис. 1). Содержание НП в фоновых почвах ниже предела обнаружения метода.

Для верхних горизонтов (0–10 см) хемозёмов всего ореола загрязнения характерно повышенное содержание НП (табл. 1), что связано с закреплением техногенных углеводородов органическими компонентами почв, обладающими высокой нефтеемкостью.

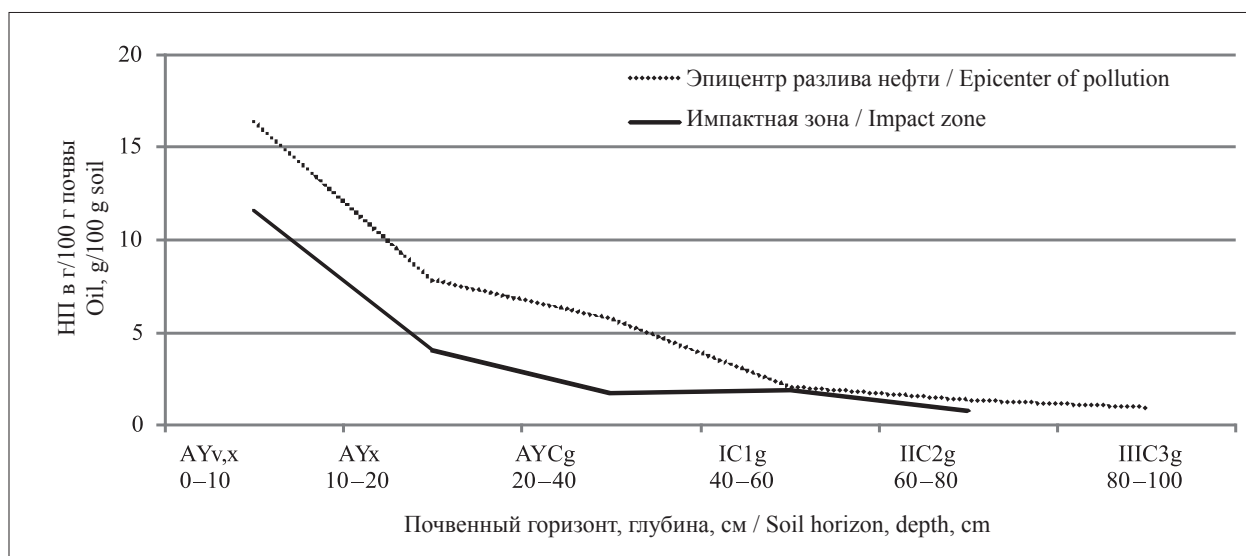


Рис. 1. Распределение нефтепродуктов в профиле нефтезагрязнённых почв (эпицентр и импактная зона загрязнения)
Fig. 1. Distribution of oil products in oil-contaminated soils (epicenter and impact zone of pollution)

Таблица 1 / Table 1

Содержание нефтепродуктов в различных зонах загрязнения / Oil content in various pollution zones

Эпицентр загрязнения Epicenter of pollution		Импактная зона Impact zone		Граница загрязнения Pollution boundary	
0-10 см / cm	10-30 см / cm	0-10 см / cm	10-30 см / cm	0-10 см / cm	10-30 см / cm
16,23-41,37	11,82-17,48	11,53-26,56	7,06-12,24	4,43-13,74	3,98-7,08
36,78	10,15	22,42	6,54	13,3	5,69

Примечание: содержание НП в г/100 г почвы (числитель – min-max, знаменатель – среднее).
 Note: NP content in g/100 g of soil (numerator – min-max, denominator – mean).

Анализ достоверностей различий содержания НП в почвах различных зон загрязнения свидетельствует об их значимости ($p < 0,05$) и характеризуется минимальными отклонениями данного показателя от среднего значения. Неоднородность загрязнения связана с аккумуляцией поллютантов в микропонижениях рельефа, проникновением нефти по трещинам вдоль корневых систем растений, поровому пространству почв, а также её сорбцией в отдельных горизонтах, что определяет мозаичную, пятнистую картину загрязнения почвенного покрова.

Полевые наблюдения свидетельствуют о том, что наибольшие морфологические преобразования испытывает корнеобитаемый слой почв. В результате слипания почвенных агрегатов в твёрдую цементированную массу на поверхности почв формируется плотная битуминозная корка мощностью 4–7 см, способствующая переувлажнению почвенного профиля, следствием которого является оглеение верхних горизонтов почв. Нижележащие горизонты более тяжёлого гранулометрического

состава (IC_{1g} , PC_{2g}) также затрудняют миграцию углеводородов по профилю, в результате чего в этих горизонтах отмечается некоторое повышение содержания НП.

Каждый разлив сырой нефти при добыче углеводородного сырья сопровождается поступлением в экосистемы легкорастворимых солей, которые в различном соотношении с органической частью нефти находятся в технологических жидкостях (буровые растворы, пластовые жидкости), что является одной из наиболее распространённых причин техногенного засоления почв.

Максимальное количество солей аккумулируется в корнеобитаемом слое почв (табл. 2).

В соответствии с общепринятой классификацией Ф.Р. Зайделямана [14] исследованные нефтезагрязнённые почвы имеют среднюю степень засоления в эпицентре, слабую – в импактной зоне и на границе загрязнения. Тип засоления по анионному составу сульфатный, по катионному – натриевый. Главным диагностическим признаком экологического действия солей принято считать суммарное

Таблица 2 / Table 2

Солевой состав и тип засоления почв различных зон загрязнения
Salt composition and type of salinization of soils in various pollution zones

Зона загрязнения, глубина, см Contamination zone, depth, cm		Плотный остаток, % Dense residue, %	Степень засоления Salinity type	Тип засоления по анионному составу Anionic salinity type	Тип засоления по катионному составу Cationic salinity type	Сумма токсичных солей, % The amount of toxic salts, %
Эпицентр загрязнения Epicenter of pollution	0–10	<u>0,35–1,12</u> 0,54	средняя medium	сульфатный sulfate	натриевый sodium	<u>0,28–0,33</u> 0,31
	10–30	<u>0,45–0,65</u> 0,48				<u>0,18–0,29</u> 0,26
Импактная зона Impact zone	0–10	<u>0,45–0,55</u> 0,48				слабая low
	10–30	<u>0,3–0,75</u> 0,36	<u>0,15–0,21</u> 0,18			
Граница загрязнения Pollution boundary	0–10	<u>0,29–0,60</u> 0,32	незасоленные non-saline			<u>0,14–0,17</u> 0,16
	10–30	<u>0,15–0,29</u> 0,24		<u>0,07–0,13</u> 0,09		

Примечание: числитель – min-max, знаменатель – среднее значение.
Note: numerator – min-max, denominator – mean.

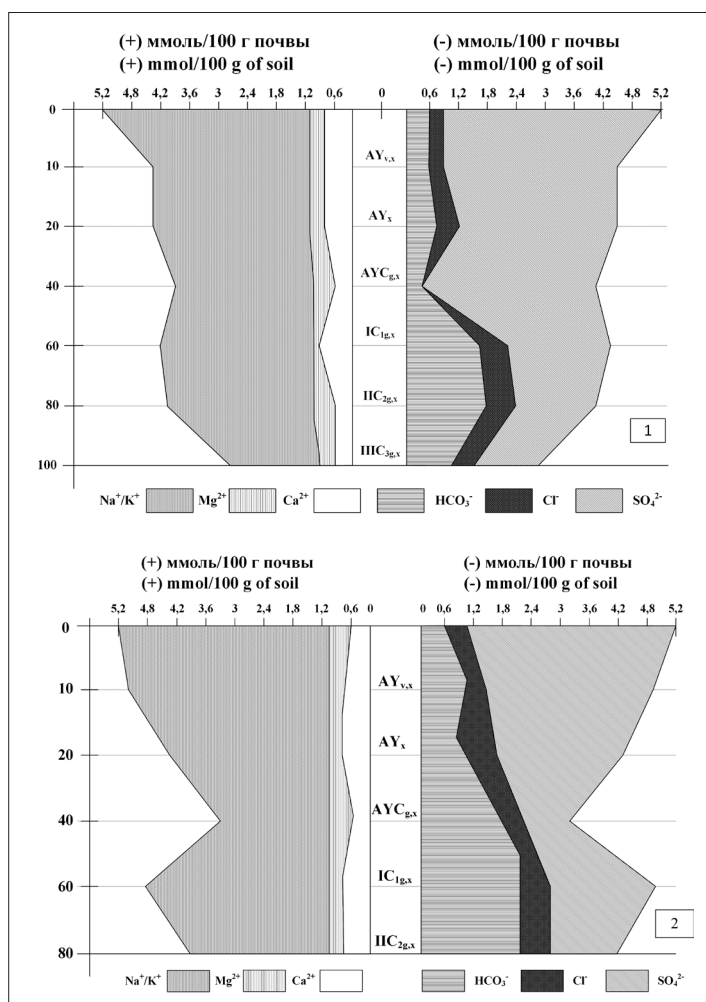


Рис. 2. Солевой профиль нефтезагрязнённых аллювиальных почв в эпицентре (1) и в импактной зоне (2) загрязнения / Fig. 2. Salt soil profile of oil-contaminated alluvial soils in the epicenter (1) and impact zone (2) of pollution

содержание токсичных солей. Наличие в почве легкорастворимых солей в количествах, превышающих общепринятый порог токсичности (0,15%), вызывает угнетение роста и развития растений, что является решающим фактором при проведении фитомелиоративного посева трав во время биологического этапа рекультивационных работ [15–18]. В исследованных почвах токсичные техногенные соли представлены NaCl, Na₂SO₄, MgCl₂ – солями, которые могут привести к локальной гибели растительности и образованию незарастающих участков – «прогалин».

Засоление почв сочетается с повышенным содержанием НП, что определяет одну из специфических особенностей техногенного галогенеза в районах гумидного почвообразования, приводящего к формированию антропогенно-преобразованных почв, представленных битуминозными хемозёмами [14]. Результаты корреляционного анализа указывают на прямую связь между содержанием легкорастворимых солей и НП в загрязнённых почвах – коэффициент корреляции (*r*) составляет 0,87 (для глубины 0–10 см) и 0,83 (для глубины 10–30 см).

Внутрипочвенное движение техногенных жидкостей сопровождается фракционированием состава ионов. Минерализованные воды формируют в эпицентре загрязнения призматический солевой профиль (рис. 2) – соли аккумулируются в значительных количествах по всему профилю с абсолютным максимумом в верхней его части, что свидетельствует о прогрессивном засолении данной зоны. Солевой профиль почв импактной зоны загрязнения также имеет выраженный максимум накопления солей в гумусовых горизонтах и второй максимум – в горизонтах тяжёлого гранулометрического состава на глубине 60 см при общем невысоком содержании солей в остальной толще почвы. В ходе такой дифференциации почвенного профиля создаётся возможность развития сопутствующего солончакового процесса наряду с основными процессами, формирующими профиль аллювиальных почв (дернового, аллювиального, глеевого).

Таким образом, особенности пойменных ландшафтов: близкий подпор грунтовых вод, механическая суффозия, сезонная пульсация, эрозионно-аккумулятивные процессы способствуют накоплению поллютантов, приносимых с поверхностным стоком и грунтовыми водами из элювиальных и трансэлювиальных ландшафтов. В этой связи загрязнение аллювиальных почв НП представляет серьёзную

экологическую опасность, угрожающую распространением в природных экосистемах загрязняющих веществ и их поступлением в речную сеть. На нефтезагрязнённых участках поймы формируются новые антропогенно-преобразованные почвы (хемозёмы).

Заключение

В условиях гумидного почвообразования Западной Сибири в результате эксплуатации объектов нефтепромыслов техногенный галогенез сопровождается засолением почв легкорастворимыми солями, в составе которых значительную роль играют сульфат-ионы и ионы натрия. Факт наличия в почвенном профиле легкорастворимых солей свидетельствует о развитии начальной стадии процессов техногенного галогенеза и связанного с ним солончакового процесса – явлений, не характерных для почв гумидного почвообразования. В этой связи изучение трендов техногенной эволюции почвенного покрова, интенсивности трансформации свойств почв в зоне техногенеза необходимо как для организации их мониторинга, так и для осуществления практических действий – рекультивации нарушенных земель. Легкорастворимые соли создают токсичную обстановку для высших растений при фитомелиоративном посеве трав в ходе проведения биологического этапа восстановительных работ. Одним из научно-обоснованных способов биологической рекультивации нефтезагрязнённых почв может стать применение рулонных биоматов. Данный материал способен удерживать семена нефтестойких трав, которые обычно вымываются из почвы осадками, таким образом создавая выдержанный по густоте и площади растительный слой, а также изолируя растения от негативного влияния образовавшихся в результате загрязнения токсичных солей. Учёт и анализ последствий техногенного галогенеза аллювиальных почв позволит повысить эффективность мероприятий по сохранению их природного потенциала и выполнению почвовосстановительных работ.

References

1. Solntseva N.P. Soil evolutionary trends in the technogenesis zone // Soil Science. 2002. No. 1. P. 9–20 (in Russian).
2. Gennadiyev A.N. Oil and environment // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya. 2016. No. 6. P. 30–39 (in Russian).

3. Zhu K., Hart W., Yang J. Remediation of petroleum-contaminated loess soil by surfactant-enhanced flushing technique // *Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*. 2005. No. 40. P. 1877–1893. doi: 10.1080/10934520500183899
4. Moldes A.B., Paradelo R., Rubinos D., Devesa Rey R., Cruz J.M., Barral M.T. Ex situ treatment of hydrocarbon-contaminated soil using biosurfactants from *Lactobacillus pentosus* // *J. Agric. Food Chem.* 2011. No. 59. P. 9443–9447. doi: 10.1021/jf201807r
5. Seredina V.P., Kolesnikova E.V., Kondykov V.A., Nepotrebnyy A.I., Ognev S.A. Features of the effect of oil pollution on soils of the middle taiga of Western Siberia // *Oil industry*. 2017. No. 5. P. 108–112 (in Russian). doi: 10.24887/0028-2448-2017-5-108-112
6. Seredina V.P., Sadykov M.E. Soils of oil fields in the middle taiga of Western Siberia and a predictive assessment of the danger of pollution by organic pollutants // *Siberian Journal of Ecology*. 2011. V. 18. No. 5. P. 617–623 (in Russian).
7. Seredina V.P., Nepotrebnyy A.I., Sadykov M.E. Property change pattern of the soils in the oily ecosystems in the humid soil-formation conditions // *Vestnik KrasGAU*. 2010. No. 10. P. 49–54 (in Russian).
8. Seredina V.P., Andreeva T.A., Alekseeva T.P., Burmistrova T.I., Tereshchenko N.N. Oil-contaminated soil: properties and reclamation. Tomsk: TPU Publishing House, 2006. 270 p. (in Russian).
9. Kapelkina L.P. Transformation of tundra ecosystems in oil development industrials of the North of Russia // *Theoretical and Applied Ecology*. 2014. No. 1. P. 49–52 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2014-1-049-052
10. Zavyalova N.V., Filimonov I.V., Kovtun V.A., Golipad A.N., Petrov S.V., Styazhkin K.K., Efremenko E.N., Kholstov V.I., Yankovskaya A.A. The main technological operations and stages of bioremediation of soils and water purification in situ // *Theoretical and Applied Ecology*. 2014. No. 4. P. 34–41 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2014-3-033-040
11. Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I., Gerasimova M.I. Classification and diagnostics of Russian soils. Smolensk: Oikumena, 2004. 342 p. (in Russian).
12. Aislabie J.M., Balks M.R., Foght J.M., Waterhouse E.J. Hydrocarbon spills on antarctic soils: effects and management // *Environmental Science & Technology*. 2004. V. 38. No. 5. P. 1265–1274. doi: 10.1021/es0305149
13. Lupachev A.V., Dey va N.F., Aladin D.Yu., Sevostyanov S.M., Demin D.V. Analysis of pollution with oil products and organochlorines of soils in the vicinity of Russian Antarctic stations // *Theoretical and Applied Ecology*. 2017. No. 2. P. 49–53 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2017-2-049-053
14. Zaydelman F.R. Land reclamation. 4th. Moskva: KDU, 2017. 290 p. (in Russian).
15. Eckmeier E., Wiesenberg G.L.B. Short-chain n-alkanes (C₁₆–C₂₀) in ancient soil are useful molecular markers for prehistoric biomass burning // *J. Archaeological Science*. 2009. No. 36. P. 1590–1596. doi: 10.1016/j.jas.2009.03.021
16. Pinedo J., Ibáñez R., Lijzen J.P.A., Irabien A. Human risk assessment of contaminated soils by oil products: total TPH content versus fraction approach // *Hum. Ecol. Risk Assess. Int. J.* 2014. V. 20. No. 5. P. 1231–1248. doi: 10.1080/10807039.2013.831264
17. Capra G.F., Ganga A., Grilli E., Vacca S., Buonadonna A.A. A review on anthropogenic soils from a worldwide perspective // *J. Soils Sediments*. 2015. No. 15. P. 1602–1618. doi: 10.1007/s11368-015-1110-x
18. Oil in the environment: legacies and lessons of the Exxon Valdez oil spill / Ed. J.A. Wiens. United Kingdom, Cambridge: Press Cambridge University, 2013. 482 p.