

УДК 631.433.53

## КОНЦЕНТРАЦИЯ CO<sub>2</sub> В ВОЗДУХЕ ПОЧВ ГОРНЫХ ТУМАННЫХ ЛЕСОВ ЮЖНОЙ МЕКСИКИ\*

© 2013 г. Е. Н. Икконен<sup>1</sup>, Н. Е. Гарсиа-Кальдерон<sup>2</sup>, Г. Альварес-Артеага<sup>2</sup>, А. Ибаньес-Уэрта<sup>2</sup>, Э. Фуэнтес-Ромеро<sup>2</sup>, Х. М. Эрнандес-Солис<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт биологии Карельского научного центра РАН, 185610, Россия, Петрозаводск, Пушкинская, 11  
e-mail: likkonen@gmail.com

<sup>2</sup>Лаборатория почвоведения “Николас Агилера”, факультет наук,  
Национальный автономный университет Мексики, Мексика, 04510

<sup>3</sup>Центр наук об атмосфере, Национальный автономный университет Мексики, Мексика, 04510

Поступила в редакцию 14.02.2011 г.

Изучали содержание CO<sub>2</sub> в почвенном воздухе фоликовых стагниковых альбиковых подзолов, расположенных на высоте 2500 и 2400 над ур. м. в пределах пояса горных туманных лесов южной Мексики. Образцы почвенного воздуха отбирали с глубины 5, 10, 20, 30, 40 и 50 см в течение одного дня с 9 до 18 ч с периодичностью 3 ч. Концентрация CO<sub>2</sub> по профилю почвы составила в среднем 2170 и 6930 ppm соответственно на высоте 2500 и 2400 над ур. м. В подзолах горных туманных лесов выявлена пространственная и временная изменчивость содержания CO<sub>2</sub> в почвенном воздухе, причем пространственная изменчивость обусловлена различиями видового состава растительного покрова и мощности органогенных горизонтов, а временная изменчивость – низким уровнем аэрации поверхностного слоя почвы и, предположительно, цикличностью корневого дыхания растений.

*Ключевые слова:* подзолы, поверхностный слой почвы, содержание CO<sub>2</sub>.

DOI: 10.7868/S0032180X13020068

### ВВЕДЕНИЕ

Накопление CO<sub>2</sub> в почве зависит от широкого спектра факторов, определяющих процессы его генерирования и транспорта. Изменчивость термодинамических условий среды, в первую очередь температуры и влажности почвы, может обусловить пространственное и временное варьирование содержания углекислого газа в почве и его эмиссию в атмосферу [1]. Концентрация CO<sub>2</sub> различается как по профилю почвы [2, 20], так и в зависимости от времени года [2, 16], гранулометрического состава [13], положения почв в ландшафте [18]. Практически нет работ, посвященных оценке пространственного варьирования содержания CO<sub>2</sub> в лесных почвах в зависимости от внешних факторов [5]. Особенно слабо изучены в этом отношении горные почвы, для которых характерно пространственное распределение по отчетливому высотному градиенту температуры и растительного покрова.

По сравнению с сезонной динамикой, суточная изменчивость содержания почвенного CO<sub>2</sub>

изучена в меньшей степени вследствие более слабых колебаний термодинамических условий среды в течение дня. Резкое повышение концентрации газа после обильных осадков может быть обусловлено снижением уровня аэрированности верхнего слоя почвы и диффузии газа, особенно в случае сохранения уровня его продуцирования [8, 16]. Изменения концентрации почвенного CO<sub>2</sub> в течение дня могут быть обусловлены динамичностью температурных условий. Ранее была показана положительная корреляция содержания CO<sub>2</sub> и температуры при высоком уровне влажности в почве, в то время как в условиях недостатка влаги наблюдалась негативная корреляция или ее отсутствие [11, 19].

Из-за высокой пространственной вариабельности почв и растительности в горных экосистемах изучение содержания и динамики CO<sub>2</sub> в профиле почв горных туманных лесов представляет интерес и является задачей данного исследования.

### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Работа была выполнена в горном районе Чинантла, расположенном на Атлантическом склоне хребта Сьерра Хуарес, южная Мексика. Район

\* Работа выполнена при финансовой поддержке SEMAR-NAT-CONASyT, проект № 23489, и PAPIIT, проект № IN224410.

**Таблица 1.** Некоторые химические и физические свойства почв участков склона хребта Сьерра Хуарес, южная Мексика [4]

Горизонт	Глубина, см	Плотность, г/см <sup>3</sup>	С	N	C/N	рН	
			г/кг			водный	солевой
Участок В-2500							
Oe	2–6	0.14	553.1	38.9	14.2	3.1	2.3
H	6–10	0.34	228.8	16.0	14.3	2.9	2.0
E	10–25	1.62	13.3	3.8	3.5	3.3	2.5
Bsg	25–70	1.24	8.4	1.6	5.1	3.5	2.6
Bs	70–105	1.16	9.2	4.0	2.3	3.5	3.4
Участок В-2400							
Oe	2–10	0.14	522.4	31.7	16.5	3.4	3.3
H	10–27	0.27	472.9	33.2	14.2	2.9	2.3
Eh	27–45	1.37	12.7	2.2	5.8	3.5	2.6
Bsg	45–70	1.20	19.9	4.8	4.1	3.7	3.6

исследований характеризуется крутыми склонами 10°–50°. Согласно классификации Кеппена, модифицированной Гарсия [14], климат района исследований классифицируется как экстратропический, умеренный изотермический, с количеством осадков более 5000 мм/год и не менее чем 50 мм осадков в самый сухой месяц года. Подобный климат с относительно стабильными температурами воздуха и чрезвычайно высоким количеством осадков на фоне постоянных туманов типичен для склонов тропических гор, ориентированных к теплым морям и океанам. На территории России подобный климат не встречается; сходная ситуация, хотя и со значительно более низкими среднегодовыми температурами, наблюдается только на некоторых Тихоокеанских островах.

Подробное описание растительного покрова и почв исследуемых участков представлено в работе Альварес с соавт. [4]. На высоте от 1100 до 2500 м над ур. м. расположены “bosques mesófilos de montaña” – горные туманные леса [12]. Участок В-2500 находится на высоте около 2500 м над ур. м. Древесный ярус сформирован 22-я видами, наиболее распространенными из которых являются *Quercus ocoteifolia* Liebm., *Clethra galeottiana* Briq., *Persea chaniissonis* Vel. Alt., *Ternstroemia oocarpa* (Rose) Melch., *Cleyera integrifolia* (Benth.) Choisy и *Weinmannia tuerckheimii* Engl. Участок В-2400 расположен на высоте около 2400 м над ур. м. Древесный ярус представлен 36-ю видами деревьев; наиболее часто встречаются *Vaccinium consanguineum* Klotzsch, *Weinmannia tuerckheimii* Engl., *Viburnum acutifolium* Benth., *Symplocos vernicosa* L.O. Williams, and *Ternstroemia oocarpa* (Rose) Melch. Доминантным видом напочвенного покрова является травянистый бамбук *Chusquea bilimekii* Fournier. Все деревья обоих участков обвиты лианами и покрыты эпифитными мхами.

Среднегодовые температуры воздуха участков В-2500 и В-2400 составляют 11.4 и 11.5°C соответственно.

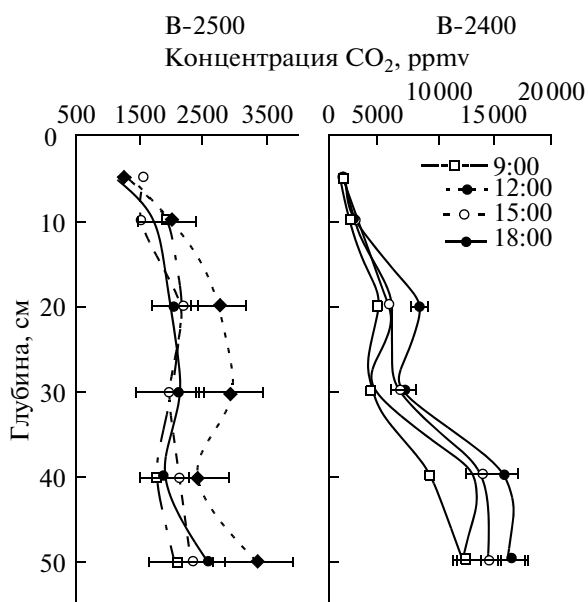
Почвенные профили обоих участков классифицированы по Мировой реферативной базе почвенных ресурсов (WRB) как фолликовые стагнические альбикозные подзолы (табл. 1). На поверхности почвы наблюдается мощная подстилка, местами переходящая в сухоторфяный горизонт. В органической части профиля выделяется слаборазложившийся опад (Oe) и перегнойный горизонт (H). В минеральной толще выделяется элювиальный осветленный горизонт, под которым залегают иллювиально-железистый горизонт, местами с признаками оглеения. Хотя по международной классификации эти почвы формально классифицируются как подзолы, в российской школе они соответствуют скорее элювиально-глеевым почвам. Гранулометрический состав исследованных почв варьирует от легкого суглинка участка В-2500 до тяжелого суглинка участка В-2400 [4].

За 6 месяцев до начала измерений концентрации CO<sub>2</sub> в почвенном профиле были установлены поливинилхлоридные трубки с внутренним диаметром 6.0 мм в двукратной повторности на глубинах: 5, 10, 20, 30, 40 и 50 см. Нижние, помещенные в почву, концы пробоотборных трубок были закрыты неразлагающейся мембраной, предотвращающей попадание в трубку почвенных частиц, но пропускающей почвенный воздух. Верхние концы трубок, выведенные над поверхностью земли, были герметично закрыты. Отбор образцов почвенного воздуха выполняли 1 марта 2008 г. на участке В-2500 и 2 марта 2008 г. на участке В-2400. На каждом участке образцы почвенного воздуха отбирали в герметично закрытые ваку-

**Таблица 2.** Дневная динамика влажности и температуры по почвенному профилю

Глубина, см	Температура, °С				Влажность, % от сухого веса
	9:00	12:00	15:00	18:00	
Участок В-2500					
5	7.0	7.5	7.0	7.0	56
10	9.0	9.0	8.0	7.5	
20	8.5	7.0	7.0	8.0	
30	8.0	7.0	7.0	7.5	
40	7.5	8.0	8.0	7.5	
50	7.0	8.0	8.0	8.0	
Участок В-2400					
5	6.5	8.0	8.5	9.0	201
10	6.5	7.5	7.5	8.5	
20	7.5	7.0	8.5	8.0	
30	8.0	7.5	9.0	8.0	
40	7.5	8.0	9.0	8.5	
50	8.0	8.0	7.5	9.0	

умированные стеклянные емкости объемом 20 мл с 9 до 18 ч каждые 3 ч. Концентрация  $\text{CO}_2$  была измерена в лаборатории на газовом хроматографе (HP Agilent, 6890 GC System, GMI, USA), колонка Рогорас-Q (температура колонки 35°C, температура детектора 300°C, газ-носитель – азот) через 8 дней после отбора проб почвенного воздуха.



Содержание  $\text{CO}_2$  в почвенном воздухе подзолов, расположенных на высоте 2500 и 2400 над ур. м. в пределах пояса горных туманных лесов хребта Сьерра Хуарес, южная Мексика.

Одновременно с отбором образцов почвенного воздуха измеряли температуру почвы почвенным термометром Trend (WIKА, USA). Определение влажности почвы проводили на тех же глубинах весовым методом, высушивая почву при температуре 105°C. Образцы почвы на влажность брали после окончания дневного цикла отбора воздушных проб.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Температура и влажность почвы. В день отбора проб почвенного воздуха температура почвы на глубине 5–50 см варьировала в диапазоне 7.0–9.0°C на участке В-2500 и 6.5–9.0°C на участке В-2400, при средних значениях 7.7 и 8.0°C на соответствующих участках (табл. 2). С изменением глубины различия температуры почвы не превышали 2.0°C. С 9:00 до 18:00 температура почвы повысилась в среднем по профилю на 1.2°C на участке В-2400 и снизилась в среднем на 0.2°C на участке В-2500.

На участке В-2500 влажность по глубине почвенного профиля изменялась незначительно в отличие от участка В-2400, где поверхностный слой почвы (5–10 см) был увлажнен в большей степени, чем нижележащие горизонты (табл. 2). Весь профиль участка В-2400 имеет более высокую влажность, чем профиль участка В-2500 благодаря неглубокому залеганию водоупора.

Концентрация  $\text{CO}_2$  в почве варьировала в пределах 1140–3900 ppm на участке В-2500 и 1170–16500 ppm на участке В-2400. В среднем, содержание газа в почве участка В-2400 было в три раза больше, чем в почве участка В-2500.

На обоих участках содержание газа в почве статистически значимо ( $P < 0.05$ ) повышалось с увеличением глубины отбора почвенного воздуха от 5 до 20 см (рисунок). Далее с глубиной концентрация  $\text{CO}_2$  в почве увеличилась только на участке В-2400. На глубине 20–30 см содержание углекислого газа в почве участка В-2400 было в 2 раза, а на глубине 40–50 см в 7 раз выше, чем в почве соответствующих глубин участка В-2500.

Статистически достоверные различия ( $P < 0.05$ ) содержания  $\text{CO}_2$  в почве в течение дня были выявлены только для участка В-2400. На данном участке концентрация углекислого газа в почве не изменялась в течение дневного времени только на глубинах 5 и 10 см, в то время как на глубине 20–50 см она увеличилась в среднем на 50%.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Концентрация  $\text{CO}_2$  в подзолах горных туманных лесов южной Мексики на высоте 2500 м над ур. м. сопоставима с содержанием углекислого газа в дерново-подзолистых песчаных почвах сос-

новых биогеоценозов центральной части России [2], однако со снижением высотного расположения почв над уровнем моря концентрация CO<sub>2</sub> в почве значительно увеличилась. Содержание газа в почвенном профиле регулируется процессами его продуцирования и переноса. На основе имеющихся данных по характеристике почв и растительного покрова мы попытаемся проанализировать, каким из процессов: продуцированием или транспортом CO<sub>2</sub> – в большей степени обусловлено различие в концентрации CO<sub>2</sub> в подзолах горных туманных лесов, расположенных на близких высотах над уровнем моря.

В ряде работ показано, что интенсивность выделения CO<sub>2</sub> при дыхании почвенного микробного комплекса зависит от наличия питательного субстрата, то есть от содержания органического углерода [6, 10]. Исследованные участки различаются по некоторым почвенным характеристикам. Мощность гор. Н и содержание в нем органического углерода больше в почве на высоте 2400 м над ур. м. Следовательно, можно предположить, что микробное продуцирование CO<sub>2</sub> больше в подзолах участка В-2400, чем участка В-2500.

Растительный покров участка В-2400 отличается высокой плотностью древесного яруса и плотностью тонких корней, биомасса которых равна 14.4 Мг/га, что в три раза больше, чем на участке В-2500 [3]. Доминантным видом напочвенного покрова этого участка является карликовый бамбук *Chusquea bilimekii*. Виды бамбука рода *Chusquea* обладают высокой скоростью роста и общей продуктивностью, в том числе тонких корней [22]. Подземная фитомасса, особенно тонкие корни, играет существенную роль в цикле углерода в лесных экосистемах. При относительно небольшой биомассе тонкие корни отличаются большими скоростями метаболических процессов, в том числе и дыхательных [7]. Высокая плотность корневой системы бамбука может обусловить интенсивное выделение CO<sub>2</sub> в почве при дыхании корней. Также было определено, что корни бамбука *Phyllostichus pubescens* продуцируют низкомолекулярные органические кислоты в большем количестве, чем некоторые другие виды растений, что говорит о большей метаболической активности корневой системы бамбука [23]. Поскольку активность микробного комплекса зависит от количества доступного питательного субстрата, высокие объемы выделений корней бамбука могут усилить продуцирование CO<sub>2</sub> в зоне ризосферы. Несмотря на то, что остатки корешков бамбука трудно разлагаемы в условиях высокогорных лесов [23], высокая плотность подземной биомассы бамбука может обусловить интенсивное выделение в почве CO<sub>2</sub> за счет корневого и микробного дыхания и высокие значения эмиссии CO<sub>2</sub> из почвы. Сообщалось, что из всего

диапазона исследованных лесов Японии дыхание почвы самое интенсивное в бамбуковом лесу, сформированном *Phyllostichus pubescens* [9]. Таким образом, можно предположить, что продуцирование CO<sub>2</sub> в почве участка В-2400 было выше, чем в почве участка В-2500 благодаря большей подземной фитомассе и наличию более мощных органических горизонтов.

Повышенное содержание влаги в почве участка В-2400 на глубине 0–10 см и, следовательно, сокращение пористости аэрации в день измерения концентрации CO<sub>2</sub> вдоль почвенного профиля могло вызвать снижение диффузии и эмиссии CO<sub>2</sub> из почвы и, как следствие, высокое содержание углекислого газа в почве этого участка. Можно предположить, что более активное выделение CO<sub>2</sub> в процессе дыхания корней растений и почвенных микроорганизмов и меньшие скорости транспорта CO<sub>2</sub> из почвы обусловили большое содержание CO<sub>2</sub> в почвенном профиле подзолов, расположенных на высоте 2400 м над ур. м.

Дневная динамика концентрации CO<sub>2</sub> в почве. Танг с соавт. [21] определили, что повышение на 100 ppm концентрации CO<sub>2</sub> на глубине 16 см соответствует увеличению температуры почвы на 15°C. Результаты данного исследования показали, что в подзолах участка В-2400 при относительно небольшом повышении температуры в течение дня (2.5°C на глубине 5 см и 1°C на глубине 50 см) содержание CO<sub>2</sub> в почве увеличилось в среднем в 1.5 раза. Столь существенное увеличение содержания CO<sub>2</sub> в почве при незначительном росте температуры едва ли можно объяснить высокой температурной чувствительностью дыхания почвенного микробного комплекса и корневых систем растений исследуемого участка. Объяснением дневного увеличения концентрации CO<sub>2</sub> в почвенном профиле участка В-2400 может быть то, что диффузия CO<sub>2</sub> была затруднена ввиду высокой влажности и, следовательно, низкой аэрированности поверхностного слоя почвы. Однако тот факт, что содержание газа на глубине 5–10 см не изменялось в течение дня, свидетельствует о продолжении газообмена с атмосферой. Мы не можем исключить того, что дневная динамика концентрации CO<sub>2</sub> в почве была обусловлена некоторыми особенностями метаболических процессов растительных сообществ. Так, широко известен и освещен в научной литературе циркадный ритм основных физиологических и биохимических процессов растений с характерным максимумом интенсивности процесса в полдень и минимумом в полночь, проявляющийся при постоянных условиях среды [17]. Поскольку корни растений проявляют эндогенную цикличность дыхания [15], можно предположить,

что суточный ритм корневого дыхания также обусловил накопление CO<sub>2</sub> в почве в течение дня.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в подзолах горных туманных лесов выявлена пространственная изменчивость по высотам содержания CO<sub>2</sub> в почвенном воздухе, обусловленная различиями видового состава растительного покрова и мощности органических горизонтов, и временная изменчивость, связанная с уменьшением аэрации поверхностного слоя почвы и, предположительно, эндогенной цикличностью корневого дыхания растений.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Мяскина Т.Н., Сапронов Д.В., Кудеяров В.Н. Эмиссия CO<sub>2</sub> из почв различных экосистем южно-таежной зоны: Анализ данных непрерывных 12-летних круглогодичных наблюдений // Докл. АН. 2011. Т. 436. № 6. С. 843–846.
2. Смагин А.В. Газовая фаза почвы. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. 300 с.
3. Alvarez-Arteaga G. Evaluacion de los almacenes de carbono en biomasa y suelo en un bosque mesofilo de montana en la Sierra Norte de Oaxaca, Mexico. México: UNAM, 2009. 81 с.
4. Álvarez-Arteaga G., García-Calderón N.E., Krasilnikov P.V., Sedov S.N., Targulian V.O., Velázquez-Rosas N. Soil altitudinal sequence on base-poor parent material in a montane cloud forest in Sierra Juarez, Southern Mexico // Geoderma. 2008. V. 144. C. 593–612.
5. Bekele A., Kellman L., Beltrami H. Soil profile CO<sub>2</sub> concentrations in forested and clear cut sites in Nova Scotia, Canada // Forest Ecology and Management. 2007. V. 242. C. 587–597.
6. Chen G.C., Tam N.F.Y., Ye Y. Summer fluxes of atmospheric greenhouses gases N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> from mangrove soil in South China // Sci Total Environ. 2010. V. 408. № 13. C. 2761–2767.
7. Comeau P.G., Kimmins J.P. Above-and below-ground biomass and production of lodgepole pine on sites with different soil moisture regimes // Can. J. For Res. 1989. V. 19. C. 447–454.
8. Daly E., Oishi A.C., Porporato A., Katul G.G. A stochastic model for daily subsurface CO<sub>2</sub> concentration and related soil respiration // Advances in Water Resources. 2008. V. 31. C. 987–994.
9. Isagi Y., Kawahara T., Kamo K., Ito H. Net production and carbon cycling in a bamboo *Phyllostichus pubescens* stand // Plant Ecology. 1997. V. 130. C. 41–52.
10. Fang C., Moncrieff J. The variation of soil microbial respiration with depth in relation to soil carbon composition // Plant and soil. 2005. V. 268. C. 243–253.
11. Flechard C.R., Neftel A., Jocher M., Ammann C., Leifeld J., Fuhrer J. Temporal changes in soil pore space CO<sub>2</sub> concentration and storage under permanent grassland // Agricultural and Forest Meteorology. 2007. V. 142. C. 66–84.
12. Flores A., Manzanero G.I. Tipos de vegetación del estado de Oaxaca // Sociedad y Naturaleza de Oaxaca 3: Vegetación y Flora. Oaxaca, 1999. P. 7–45.
13. Fuyuan L., Linhua S., Tao T. Microbial production of CO<sub>2</sub> in red soil in Stone Forest National Park // J. of Geographical Sciences. 2003. V. 13. № 2. C. 250–256.
14. García E. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. México: UNAM, 1973. 42 p.
15. Huck M.G., Hageman R.H., Hanson J.B. Diurnal variation in root respiration // Plant Physiol. 1969. V. 37. C. 371–375.
16. Jassal R., Black A., Novak M., Morgenstern K., Nesic Z., Gaumont-Guay D. Relationship between soil CO<sub>2</sub> concentrations and forest-floor CO<sub>2</sub> effluxes // Agricultural and Forest Meteorology. 2005. V. 130. C. 176–192.
17. McClung C.R. Circadian Rhythms in Plants // Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol. 2001. V. 52. C. 139–162.
18. Pacific V.J., McGlynn B.L., Riveros-Iregui D., Welsch D.L., Epstein H.E. Variability in soil respiration across riparian-hillslope transitions // Biogeochemistry. 2008. V. 91. № 1. C. 51–70.
19. Riveros-Iregui D.A., Emanuel R.E., Muth D.J., McGlynn B.L., Epstein H.E., Welsch D.L., Pacific V.J., Wraith J.M. Diurnal hysteresis between soil CO<sub>2</sub> and soil temperature as controlled by soil water content // Geophysical Research Letters. 2007. V. 34. C. 1–5.
20. Straaten O., Veldkamp E., Kohler M., Anas I. Drought effects on soil CO<sub>2</sub> efflux in a cacao agroforestry system in Sulawesi, Indonesia // Biogeosciences Discuss. 2009. V. 6. C. 11541–11576.
21. Tang J., Baldocchi D.D., Qi Y., Xu L. Assessing soil CO<sub>2</sub> efflux using continuous measurements of CO<sub>2</sub> profiles in soils with small solid-state sensors // Agricultural and Forest Meteorology. 2003. V. 118. C. 207–220.
22. Veblen T., Schlegel F., Escobar B. Biomasa y producción primaria de *Chusquea culeou* Desv. y *Chusquea tenuiflora* Phil. En el sur de Chili // Bosque. 1979. V. 3. № 1. C. 47–56.
23. Wang Y.N., Wang M.K., Shun Y.Z., Ta C.T., Kai Y.C. Characterization of Low-Molecular-Weight Organic Acids and Organic Carbon of Taiwan Red Cypress, Peacock Pine and Moso Bamboo in a Temperate Rain Forest // Communications in Soil Science and Plant Analysis. 2007. V. 1. 38. C. 77–91.