

ЭКОЛОГИЯ МИКРООРГАНИЗМОВ, РАСТЕНИЙ

УДК 606:579.852.11+66.911.38(571.1)

*И. С. Андреева, А. С. Сафатов, Л. И. Пучкова,
Е. К. Емельянова, Г. А. Буряк, С. Е. Олькин,
И. К. Резникова, О. В. Охлопкова
г. Новосибирск, р.п. Кольцово, Россия*

КУЛЬТИВИРУЕМЫЕ МИКРООРГАНИЗМЫ В ВЫСОТНЫХ ПРОБАХ АЭРОЗОЛЕЙ ВОЗДУХА СЕВЕРА СИБИРИ В ХОДЕ САМОЛЕТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

Аннотация. В рамках комплексного изучения атмосферных загрязнений в Сибири проведено самолетное зондирование атмосферы на севере западносибирского региона по маршруту: Новосибирск – Сургут – Игарка – Новосибирск. Целью данной работы являлось исследование численности и состава культивируемых микроорганизмов и других биогенных компонентов атмосферы на высотах до 8000 м. Для последующего анализа пробы атмосферного воздуха отбирали в импинджеры (с расходом 50 ± 5 л/мин), где в качестве сорбирующей жидкости использовали 50 мл раствора Хэнкса (ICN Biomedicals), и на волокнистые фильтры. В пробах по суммарному белку фиксировали концентрацию биогенного материала, определяли концентрацию и разнообразие культивируемых микроорганизмов. Из отобранных проб атмосферного воздуха изолировано 158 мезофильных и психрофильных микроорганизмов, представленных такими родами как *Micrococcus*, *Staphylococcus*, *Bacillus*, *Nocardia*, *Arthrobacter*, *Rhodococcus* и др. Выделены также культуры актиномицетов, дрожжей и плесневых грибов. На всем спектре высот особенно широко были представлены неспороносные бактерии. Исследована ферментативная активность выделенных микроорганизмов, наличие ряда факторов патогенности. Результаты по определению численности и состава культивируемых микроорганизмов и других биогенных компонентов атмосферы на высотах до 8000 м на севере Западной Сибири были получены впервые и являются заметным вкладом в исследования атмосферы данного региона. Для определения закономерностей наблюдаемого биоразнообразия микроорганизмов, связанных с высотой взятия проб или с географическим положением, необходимы дальнейшие систематические исследования.

Ключевые слова: атмосфера; биоаэрозоли; аэрозоли атмосферного воздуха; культивируемые микроорганизмы; ферментативная активность; Сибирь; Евразия; север.

Сведения об авторах: Ирина Сергеевна Андреева¹, кандидат биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник; Александр Сергеевич Сафатов², доктор технических наук, заведующий отделом; Лариса Ивановна Пучкова³, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник; Елена Константиновна Емельянова⁴, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры гигиены и экологии; Галина Алексеевна Буряк⁵, научный сотрудник; Сергей Евгеньевич Олькин⁶, ведущий научный сотрудник; Ирина Константиновна Резникова⁷, старший научный сотрудник; Олеся Викторовна Охлопкова⁸, младший научный сотрудник.

Место работы:¹⁻⁸ФБУН Государственный научный центр вирусологии и биотехнологии «Вектор» Роспотребнадзора; ⁴ФГБОУ ВО Новосибирский государственный медицинский университет.

Контактная информация: ¹⁻⁸630559, Россия, Новосибирская обл., р.п. Кольцово; ⁴630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, д. 52; e-mail: ¹andreeva_is@vector.nsc.ru; ²safatov@vector.nsc.ru; ³puchkova_li@vector.nsc.ru; ⁴emelenl@yandex.ru; ⁵buryak@vector.nsc.ru; ⁶olkin@vector.nsc.ru; ⁷reznikova@vector.nsc.ru; ⁸ohlopko_ova@vector.nsc.ru.

Введение

Микроорганизмы, содержащиеся в атмосферных аэрозолях, имеют разнообразные источники поступления как природного (с поверхности водной и почвенной сред, фитомассы растений, пыльцы и др.), так и антропогенного характера (с поверхности урбаноземов, с выбросами от техногенных объектов и др.). Жизнеспособные клетки, находящиеся в атмосфере, проявляют устойчивость к УФ-излучению, фотохимическим окислителям, загрязнителям (окиси азота и серы, ароматические со-

единения, сажа и др.). Эти стрессорирующие факторы окружающей среды способствуют проявлению у микроорганизмов таких адаптационных возможностей как пигментообразование, формирование эндоспор, секреция новых вторичных метаболитов с широким спектром биологической активности. В связи с происходящими в современных условиях глобальными климатическими изменениями актуальность исследований атмосферных аэрозолей существенно выросла.

Существует мнение, что микроорганизмы, обнаруживаемые в атмосфере, являются не только случайными биоагентами, подхватываемыми восходящими конвективными потоками воздуха, но среди них встречается и метаболически активная резидентная микробиота, способная к размножению и участию в биогеохимическом круговороте (Womack et al. 2010). Таким образом, атмосфера может являться полноценной средой обитания. Но даже в пределах воздушной среды можно выделить несколько экологических ниш: капли воды, атмосферные снег и лед, поверхность твердых частиц и пыли, где содержание микроорганизмов может варьировать. Имеются отличия в численности и разнообразии микроорганизмов в атмосфере и воды в ней: в исследованиях (Xu et al. 2017) подчеркивается, что на значительных высотах бактериальное обилие (индекс видового разнообразия $Chao1$) воды облаков было выше, чем в атмосферных аэрозолях, даже после ураганов и пыльных бурь. По-видимому, это связано с наличием растворенных в атмосферной воде питательных веществ, концентрация которых может достигать уровня олиготрофных озер (Pearce et al. 2009). Что касается расчетов длительности пребывания биоаэрозолей с момента попадания в атмосферу до момента осадения, то период «витания» может быть от 2,2 до 188,1 дня, а среднее время пребывания клеток в воздухе составляет 1 неделю (Williams et al. 2002; Burrows et al. 2009).

Интересно, что в исследовании (Ravva et al. 2012) содержание культивируемых бактерий в атмосферных аэрозолях колебалось от 3 КОЕ до 6×10^6 КОЕ/м³ воздуха и значительно зависело от сезонных температур, но не от влажности воздуха или скорости ветра. К настоящему времени установлено, что наибольшие значения КОЕ в атмосфере наблюдаются летом и осенью, а в течение суток в концентрации бактерий может иметься два пика – утром и вечером (Tong et al. 2007; Fang et al. 2007; Lighthart, Shaffer 1995; Shaffer, Lighthart 1997). Предполагается, что на ежедневные и еженедельные изменения в численности бактерий в атмосферных сообществах влияют антропогенные источники, а сезонные изменения вызваны климатическими и атмосферными процессами (Maron et al. 2006).

Отмечена зависимость между особенностями почвенно-растительного покрова и концентрациями клеток бактерий в приземном слое воздуха (Bertolini et al. 2013; Shaffer, Lighthart 1997; Tong et al. 2007). Количество биоаэрозолей, захватываемых восходящими воздушными потоками с поверхности почвы и

растительности, может быть измерено (Burrows et al. 2009a, 2009b). Например, в исследовании (Lighthart, Shaffer 1994) для географической зоны пустыни с кустарниковой растительностью на территории США оценен максимальный восходящий поток биоаэрозолей в дневное время – 17 000 КОЕ м⁻²/ч⁻¹ и показано, что он зависит от интенсивности нагревания земной поверхности: чем лучше прогревание, тем интенсивнее происходят восходящие конвективные движения воздуха. Несмотря на то, что восходящий поток бактерий уменьшался после полудня, их концентрация в атмосфере продолжала увеличиваться. Предположительно, авторы связывают это с уменьшением интенсивности солнечной радиации во второй половине дня, что позволяет увеличить выживаемость высвобождаемых от поверхности земли бактериальных клеток.

Существенную роль в привнесении биоаэрозолей в атмосферу оказывают азиатские пыльные бури, микроорганизмы из которых транспортируются на значительные расстояния от места их возникновения. Пылевые частицы снижают степень проникновения УФ-лучей, губительно воздействующих на живые клетки, и обеспечивают наличие питательных веществ (Kakikawa 2008). Показатель КОЕ при этом может увеличиться от нескольких раз до нескольких порядков по сравнению с условиями до пыльной бури (Nara, Zhang 2012). Зарегистрирован перенос биологических частиц с пылью из Средней Азии в Западную Сибирь (Андреева и др. 2018), перенос бактериальных клеток с территории Восточной Сибири через Монголию до Великой Китайской равнины, причем эти пробы воздуха имели наибольшее видовое богатство и разнообразие по сравнению с другими в этом исследовании, внутриконтинентальными и принесенными потоками со стороны океана (Xu 2019). Ранее исследования содержания биоаэрозолей и суммарного белка на территории Сибири проводились для других областей: прибрежной зоны Байкала (Сергеев и др. 2009; Matthias-Maser et al. 2000) и юга Западной Сибири (Андреева и др. 2000).

Целью данной работы являлось исследование на высотах до 8 000 м численности и разнообразия культивируемых микроорганизмов над территорией севера Сибири.

Материалы и методы

Отбор высотных проб атмосферного воздуха осуществляли по маршруту Новосибирск – Сургут – Игарка – Новосибирск и Новосибирск – Сургут – Новосибирск с помощью лаборатории «Оптик-Э», смонтированной на са-

молете ТУ-134. Самолет пролетал в дневное время 16–18 июля 2017 г. над территорией Сибири на высотах от 400 до 8 000 м.

Для определения массы суммарного белка для каждой высоты отбирали пробы воздуха на фильтры типа АФА-ХА-20. Определение в пробах массовой концентрации суммарного белка проводили флуорометрическим методом, основанным на приобретении белком интенсивной флуоресценции после его модификации флуорогенным реактивом. Для микробиологического анализа пробы атмосферного воздуха отбирали в импинджеры, содержащие 50 мл раствора Хенкса в качестве сорбирующей жидкости с расходом 50 л/мин.

Выделение микроорганизмов проводили, высевая пробы на питательные среды, позволяющие выявить микроорганизмы различных таксономических групп: на агаризованную и жидкую среду LB (Difco, USA), обедненную среду LB (разбавление 1:10), крахмало-аммиачный агар (КАА), почвенный агар (ПА), среду Сабуро (Методы 1984; Определитель 1997). Инкубировали высевы при температурах 28–30 и 6–9°C в течение 3–14 суток. Расчет числа культивируемых микроорганизмов в пробах проводили по стандартным методам (Ашмарин, Воробьев 1962), при этом количество микроорганизмов определяли по 3–4 параллелям проб, рассеянных на 4–5 различных средах.

Индивидуальные колонии микроорганизмов использовали для получения чистых культур и последующего анализа фенотипических свойств стандартными методами (Методы 1984). Морфологию клеток микроорганизмов исследовали с помощью фазово-контрастной микроскопии (микроскоп Axioskop 40, "CarlZeiss", Германия).

Скрининг ферментативной активности культур проводили в соответствии с (Методы 1984). Выделенные штаммы микроорганизмов хранили при низкотемпературном замораживании в коллекции природных изолятов ФБУН ГНЦ ВБ «Вектор» Роспотребнадзора.

Результаты и обсуждение

В рамках комплексного изучения атмосферных загрязнений в Сибири проведено самолетное зондирование атмосферы на севере Западно-Сибирского региона, расположенного на территории Западно-Сибирской равнины, представленного природными зонами тундры, лесотундры и тайги. По климатическим усло-

виям г. Сургут и п. Игарка приравнены к Крайнему Северу.

Масса суммарного белка является универсальным маркером наличия компонентов биологического происхождения. С помощью данного показателя можно судить о насыщенности атмосферы биологическими частицами. В пробах фиксировалась концентрация биогенного материала по суммарному белку (в том числе его доля в полной массе аэрозоля). Суммарный белок находился в пределах от 0 до 0,663 мкг/м³. На высотах 4 000–8 000 м содержание суммарного белка было ниже, чем на высотах 400–500 м, примерно в 6 раз (табл. 1), что, скорее всего, объясняется существенным вкладом наземных источников в пул аэрозолей нижних слоев атмосферы. Ранее были определены значения величин суммарного белка для аэрозолей юга Западной Сибири, которые колебались от 0,11±0,10 в 2001 г. до 0,89±0,21 в 2006 г. Летом средние значения суммарного белка в воздухе на юге Западной Сибири были выше, чем в другие сезоны года, и составляли 0,75±0,07 мкг/м³ (Сафатов и др. 2014).

Высев проб атмосферных аэрозолей позволил выделить 158 чистых культур микроорганизмов, из них 123 были мезофильными, 35 психрофильными. Наибольшее разнообразие бактериальных видов было представлено на агаризованных средах LB, LB 1:10 и ПА, незначительное на КАА, как для культивирования при температуре 28–30°C, так и при 6–9°C.

На этапе маршрута Новосибирск – Сургут – Игарка (промежуточный ориентир полета – над г. Норильском) среди выделенных мезофильных и психрофильных штаммов преобладали неспороносные бактерии. Полет Игарка – Новосибирск (промежуточный ориентир полета – над п. Бор) показал преобладание в пробах атмосферного воздуха неспороносных бактерий и кокков среди мезофилов, и неспороносных бактерий среди психрофилов (табл. 2).

Пробы третьей части маршрута Новосибирск – Сургут – Новосибирск отличались от предыдущих по качественному составу: в разных пробах преобладали по численности мезофильные спорообразующие бактерии, неспороносные бактерии, кокки; отдельные пробы содержали актиномицеты, психрофильные бактерии были представлены неспороносными бактериями и кокками. Ни одна проба не содержала большого количества грибов. Психрофильные дрожжи и спорообразующие бактерии, культивируемые в условиях опыта, не были обнаружены.

Таблица 1

Концентрации суммарного белка в атмосфере на различных сегментах полета

Дата, сегмент полета	Время	Высота, м	Объем, м ³	Белок, мкг/м ³
16.07.2017 Новосибирск–Сургут	11:52–12:26	4 000	13,034	0
	12:36–13:01	400	7,454	0,134
	13:03–13:37	500	11,023	0,663
16.07.2017 Сургут–Игарка	15:00–15:38	4 000	13,862	0
	15:47–16:24	400	11,039	0,053
	16:26–16:42	300–400	5,192	0,014
	16:52–17:36	4 000	12,357	0
17.07.2017 Игарка–Новосибирск	10:14–10:34	4 000	7,494	0
	10:46–11:05	400–500	5,828	0,036
	11:15–11:36	4 000	7,256	0,057
	11:44–12:06	400	6,628	0,053
	12:15–12:35	4 000	7,451	0
18.07.2017 Новосибирск–Сургут–Новосибирск	12:46–13:12	400	7,645	0,175
	7:35–7:47	8 000	4,74	0,066
	7:59–8:13	4 000	4,487	0,078
	8:23–8:47	500–700	7,203	0,257
	9:10–9:24	8000	6,026	0,024
	9:35–9:54	4 000	6,315	0,066
10:03–10:38	400	6,963	0,217	

Примечание: «0» – пробы, в которых концентрация находится ниже предела обнаружения.

Таблица 2

Концентрации и представительство культивируемых микроорганизмов в атмосфере на различных сегментах полета, выявленные при температуре культивирования высевок 6-9 и 28-30°C

Сегмент полета	№ пробы	Время пробоотбора	Высота, м	Группы микроорганизмов (%)					
				Бациллы	Кокки	Неспороносные	Грибы	Активные	Дрожжи
<i>Мезофильные микроорганизмы, выделенные при температуре культивирования 28–30°C</i>									
Новосибирск – Сургут – Игарка	1	11:54–12:24	4000	0	12,50	12,50	0	75,00	0
	2	12:36–13:38	400–500	0	30,06	66,46	0,32	0	3,16
	3	15:00–15:30	4000	0	0	93,56	0,31	6,13	0
	4	15:38–16:33	400–300	17,86	0	80,36	1,79	0	0
	5	16:50–17:33	4000	0	5,56	94,44	0	0	0
Игарка – Новосибирск	6	10:14–10:33	4000	0	100,00	0	0	0	0
	7	10:46–11:05	400–500	0	0	86,55	2,80	10,65	0
	8	11:15–11:35	4000	0	66,67	16,67	16,66	0	0
	9	11:44–12:07	400	0	0	53,60	0,18	46,21	0
	10	12:14–12:35	4000	0	89,47	0	10,53	0	0
	11	12:46–13:12	400	0	3,55	95,74	0,71	0	0
Новосибирск – Сургут	12	7:35–7:47	8000	0	83,33	0	16,67	0	0
	13	7:59–8:12	4000	0	20,00	20,00	0	60,00	0
	14	8:23–8:35	500–700	0	100,00	0	0	0	0
	15	9:09–9:27	8000	100	0	0	0	0	0
	16	8:34–9:54	4000	0	50,00	0	0	50,00	0
	17	10:03–10:26	400	0	0	0	100,00	0	0

Окончание таблицы 2

Сегмент полета	№ пробы	Время пробоотбора	Высота, м	Группы микроорганизмов (%)					
				Бациллы	Кокки	Неспороносные	Грибы	Активные	Дрожжи
<i>Психрофильные микроорганизмы, выделенные при температуре культивирования 6–9°C</i>									
Новосибирск – Сургут – Игарка	1	11:54–12:24	4000	0	0	25,00	50,00	25,00	0
	2	12:36–13:38	400–500	0	22,07	73,10	0,69	4,14	0
	3	15:00–15:30	4000	0	0	89,47	10,53	0	0
	4	15:38–16:33	300–400	0	0	47,62	52,38	0	0
	5	16:50–17:33	4000	0	0	100,00	0	0	0
Игарка – Новосибирск	6	10:14–10:33	4000	0	0	0	100,00	0	0
	7	10:46–11:05	400–500	0	0	93,55	6,45	0	0
	8	11:15–11:35	4000	0	0	66,67	33,33	0	0
	9	11:44–12:07	400	0	10,99	65,93	23,08	0	0
	10	12:14–12:35	4000	0	20,00	40,00	40,00	0	0
	11	12:46–13:12	400	0	0	83,33	16,67	0	0
Новосибирск – Сургут	12	7:35–7:47	8000	–	–	–	–	–	–
	13	7:59–8:12	4000	0	0	100,00	0	0	0
	14	8:23–8:35	500–700	–	–	–	–	–	–
	15	9:09–9:27	8000	0	0	0	100,00	0	0
	16	8:34–9:54	4000	0	0	98,04	1,96	0	0
	17	10:03–10:26	400	0	32,26	0	67,74	0	0

Сравнение содержания основных выделенных групп бактерий показывает, что как в нашем исследовании, так и в других работах, где отбор проб осуществлялся над сельскими или природными территориями, среди грамотрицательных бактерий преобладали представители протеобактерий, а среди грамположительных – фирмикуты (Lighthart 1997; Maron et al. 2005; Fang et al. 2007).

Концентрация бактерий в приземном воздухе, по данным многочисленных исследований, в среднем составляет 10^2 – 10^6 клеток/м³. Над равнинными и низменными участками суши, где ведется активная сельскохозяйственная или промышленная деятельность, содержание бактерий в воздухе обычно составляет около 10^5 – 10^6 клеток/м³ (Bowers et al. 2011a; 2011b). В прибрежных у океана и высокогорных районах концентрация бактерий обычно ниже – менее 10^4 – 10^5 клеток/м³ (Bowers et al. 2012). В тропосфере содержание клеток еще ниже и достигает от 0,36 до 3×10^5 клеток/м³ (DeLeon-Rodriguez et al. 2013; Maki et al. 2013).

Итак, в исследованиях максимальных значений численность выделяемых микроорганизмов при температуре культивирования 28–30°C достигала $1,3 \times 10^4$ КОЕ/м³, при температуре культивирования 6–9°C – $6,3 \times 10^3$ КОЕ/м³; минимальные значения численности микроорганизмов, выделяемых при тех же температур-

ных условиях, составляли, соответственно, $1,6 \times 10$ и 9 КОЕ/м³. Следует отметить, что корреляции в концентрации белка и численности обнаруживаемых микроорганизмов в исследуемых аэрозолях не наблюдали, что свидетельствует о наличии достаточно большого количества биогенных компонентов в атмосфере не микробного происхождения.

Ферментативная активность выделенных мезофильных бактериальных изолятов: протеолитической активностью обладали 30% из числа исследуемых бактерий, липолитической – 51%, фосфолипазной – 37%, амилитической – 6% изолятов. Психрофильные бактерии значительно отличались по изучаемым спектрам активности: протеолитической активностью обладали 60%, липолитической – 6%, фосфолипазной – 34%, амилитической – 8,5% изолятов. Протеолитические, липолитические и фосфолипазные свойства у бактерий являются потенциальными признаками патогенности – факторами инвазии при проникновении в организм хозяина.

Типичной картиной высева являлось богатое разнообразие яркоокрашенных колоний: желтую и оранжевую пигментацию имели 40% выделенных мезофильных и 48% психрофильных штаммов. В аналогичных исследованиях разнообразия микроорганизмов аэрозолей воздуха пигментированные бактерии составляли

от 21 до 62% от общего числа выделенных (Shaffner, Lighthart 1997). Следует отметить, что пигментообразование у микробов имеет определенное физиологическое значение. Пигменты обеспечивают защиту клеток от природной ультрафиолетовой радиации, участвуют в биохимических реакциях, обладают антибиотическим действием.

Выводы

В пробах выявлены микроорганизмы широко распространенных родов, таких как

Micrococcus, Staphylococcus, Bacillus, Nocardia, Arthrobacter, Rhodococcus, а также – актиномицеты, дрожжи и плесневые грибы. Анализ полученных данных не позволил выявить надежных связей изменения наблюдаемого биоразнообразия микроорганизмов в пробах с высотой взятия проб или с географическим положением. Очевидно, что полученных данных в настоящее время недостаточно для выявления этих закономерностей, для этого необходимы дальнейшие систематические исследования.

ЛИТЕРАТУРА

- Андреева И. С., Белан Б. Д., Бородулин А. И., Буряк Г. А., Марченко Ю. В., Олькин С. Е., Панченко М. В., Петрищенко В. А., Пьянков О. В., Резникова И. К., Сафатов А. С., Сергеев А. Н., Степанова Е. В. 2000. Изучение изменчивости биогенной компоненты атмосферного аэрозоля над лесными массивами Западной Сибири // *Оптика атмосферы и океана* 13:06-07, 639–644.
- Андреева И. С., Сафатов А. С., Пучкова Л. И., Емельянова Е. К., Буряк Г. А., Терновой В. А. 2018. Споробразующие бактерии, выделенные из аэрозолей воздуха юга Западной Сибири, во время атмосферного переноса воздушных масс // *Вестник Нижневартковского государственного университета* 3, 123–130.
- Ашмарин И. П., Воробьев А. А. 1962. Статистические методы в микробиологических исследованиях. Л.: МЕДГИЗ, 180.
- Методы общей бактериологии. 1984 / Герхард Ф., Мюррэй Р., Костилоу Р., Нестер Ю., Вуд В., Криг Н., Филипс Г. (ред.) М.: Мир. Т. 3.
- Определитель бактерий Берджи. 1997 / Хоулт Дж. (ред.). М.: Мир. Т. 2.
- Сафатов А. С., Буряк Г. А., Олькин С. Е., Резникова И. К., Макаров В. И., Попова С. А. 2013. Мониторинг концентраций органического/неорганического углерода и суммарного белка в аэрозоле приземного слоя атмосферы юга Западной Сибири // *Оптика атмосферы и океана* 26(12), 1054–1058.
- Сергеев А. Н., Сафатов А. С., Агафонов А. П., Андреева И. С., Аршинов М. Ю., Белан Б. Д., Буряк Г. А., Генералов В. М., Захарова Ю. Р., Лаптева Н. А., Олькин С. Е., Панченко М. В., Парфенова В. В., Резникова И. К., Симоненков Д. В., Теплякова Т. В., Терновой В. А. 2009. Сравнение присутствия химических и биологических маркеров в поверхностном микрослое воды акваторий курортных зон озера Байкал и в атмосферном аэрозоле этого региона // *Оптика атмосферы и океана* 22(6), 585–594.
- Bertolini V., Gandolfi I., Ambrosini R., Bestetti G., Innocente E., Rampazzo G., Franzetti A. 2013. Temporal variability and effect of environmental variables on airborne bacterial communities in an urban area of Northern Italy // *Appl. Microbiol. Biotechnol* 59, 177–183. DOI: 10.1007/s00253-012-4450-0.
- Bowers R., McCubbin I., Hallar A., Fierer N. 2012. Seasonal variability in airborne bacterial communities at a high-elevation site // *Atmospheric Environment* 50, 41–49.
- Bowers R., McLechie S., Knight R., Fierer N. 2011a. Spatial variability in airborne bacterial communities across land-use types and their relationship to the bacterial communities of potential source environments // *ISME J.* 5, 601–612. DOI: 10.1038/ismej. 2010. 167.
- Bowers R., Sullivan A., Costello E., Collett J., Knight R., Fierer N. 2011b. Sources of bacteria in outdoor air across cities in the Midwestern United States // *Appl. Environ. Microbiol.* 77, 6350–6356. DOI: 10.1128/AEM.05498-11.
- Burrows S., Elbert W., Lawrence M., Pösch U. 2009. Bacteria in the global atmosphere – Part 1: Review and synthesis of literature data for different ecosystems // *Atmos. Chem. Phys.* 9, 9263–9280. DOI: org/10.5194/acp-9-9263-2009.
- Burrows S., Butler T., Jöckel P., Tost H., Kerkweg A., Pöschl U., Lawrence M. 2009. Bacteria in the global atmosphere – Part 2: Modeling of emissions and transport between different ecosystems // *Atmos. Chem. Phys.* 9(23), 9281–9297.
- Fang Z., Ouyang Z., Zheng H., Wang X., Hu L. 2007. Culturable airborne bacteria in outdoor environments in Beijing, China // *Microb. Ecol.* 54, 487–496. DOI:10.1007/s00248-007-9216-3.
- Hara K., Zhang D. 2012. Bacterial abundance and viability in long-range transported dust // *Atmos. Environ* 47, 20–25.
- Kakikawa M., Kobayashi F., Maki T., Yamada M., Higashi T., Chen B., Shi G., Hong C., Tobo Y., Iwasaka Y. 2008. Dustborne microorganisms in the atmosphere over an Asian dust source region, Dunhuang // *Air Qual Atmos Health* 1(4), 195–202. DOI:10.1007/s11869-008-0024-9.
- Lighthart B. 1997. The ecology of bacteria in the alfresco atmosphere // *FEMS Microbiol. Ecol.* 23(4), 263–274. DOI: 10.1111/j.1574-6941.1997.tb00408.x.

Lighthart B., Shaffer B. 1994. Bacterial flux from chaparral into the atmosphere in mid-summer at a high desert location // *Atmos. Environ.* 28(7), 1267–1274.

Lighthart B., Shaffer B.T. 1995. Airborne bacteria in the atmospheric surface layer: temporal distribution above a grass seed field // *Appl. Environ. Microbiol.* 61, 1492–1496.

Maki T., Kakikawa M., Kobayashi F., Yamada M., Matsuki A., Hasegawa H., Iwasaka Y. 2013. Assessment of composition and origin of airborne bacteria in the free troposphere over Japan // *Atmos. Environ.* 74, 73–82.

Maron P., Mougel C., Lejon D.P.H., Carvalho E., Bizet K., Marck G., Cubito N., Lemanceau P., Ranjard L. 2006. Temporal variability of airborne bacterial community structure in an urban area // *Atmos. Environ.* 40, 8074–8080.

Matthias-Maser S., Obolkin V., Khodzer T., Jaenicke R. 2000. Seasonal variation of primary biological aerosol particles in the remote continental region of Lake Baikal/Siberia // *Atmos. Environ.* 34, 3805–3811.

Pearce D., Bridge P., Hughes K., Sattler B., Psenner R., Russell N. 2009. Microorganisms in the atmosphere over Antarctica // *FEMS Microbiol. Ecol.* 69, 143–157. DOI:10.1111/j.1574-6941.2009.00706.x.

Ravva S., Hernlem B., Sarreal C., Mandrella R. 2012. Bacterial communities in urban aerosols collected with wetted-wall cyclonic samplers and seasonal fluctuations of live and culturable airborne bacteria // *J. Environ. Monit.* 14(2), 473–481.

Shaffer T., Lighthart B. 1997. Survey of Culturable Airborne Bacteria at Four Diverse Locations in Oregon: Urban, Rural, Forest, and Coastal // *Microbial Ecol.* 34(3), 167–177.

Tong Y., Lighthart B. 1999. Diurnal distribution of total and culturable atmospheric bacteria at a rural site // *Aerosol Sci. Technol.* 30, 246–254. DOI:10.1080/027868299304822.

Tong Y., Lighthart B. 2000. The annual bacterial particle concentration and size distribution in the ambient atmosphere in a rural area of the Willamette Valley, Oregon // *Aerosol Sci. Technol.* 32, 393–403. DOI:10.1080/027868200303533.

Williams J., De Reus M., Krejci R., Fischer H., Ström J. 2002. Application of the variability-size relationship to atmospheric aerosol studies: estimating aerosol lifetimes and ages // *Atmos. Chem. Phys.* 2, 133–145. DOI:10.5194/acp-2-133-2002.

Womack A., Bohannan J., Green J. 2010. Biodiversity and biogeography of the atmosphere // *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 365, 3645–3653. DOI: org/10.1098/rstb.2010.0283.

Xu C., Wei M., Chen J., Sui X., Zhu C., Li J., Zheng L., Sui G., Li W., Wang W., Zhang O., Mellouki A. 2017. Investigation of diverse bacteria in cloud water at Mt. Tai, China // *Science of The Total Environment* 580(15), 258–265.

Xu C., Wei M., Chen J., Zhu C., Li J., Xu X., Wang W., Zhang Q., Ding A., Kan H., Zhao Z., Mellouki A. 2019. Profile of inhalable bacteria in PM_{2.5} at Mt. Tai, China: Abundance, community, and influence of air mass trajectories // *Ecotoxicology and Environmental Safety* 168, 110–119.

REFERENCES

Andreeva, I.S., Belan, B.D., Borodulin, A.I., Buryak, G.A., Marchenko, Yu.V., Olkin, S.E., Panchenko, M.V., Petrishchenko, V.A., Pyankov, O.V., Reznikova, I.K., Safatov, A.S., Sergeev, A.N., & Stepanova, E.V. Izucheniye izmenchivosti biogennoy komponenty atmosfernogo aerolya nad lesnymi massivami Zapadnoy Sibiri [Variability of biogenic component of atmospheric aerosol over forested areas of Western Siberia]. In: *Optika Atmosfery i Okeana*, 2000 (13), issue 6-7, pp. 592–596. (In Russian).

Andreeva, I.S., Safatov, A.S., Puchkova, L.I., Emelyanova, E.K., Buryak, G.A., & Ternovoy, V.A. Sporoobrazuyushchie bakterii, vydelennye iz aehrozolej vozduha yuga Zapadnoj Sibiri, vo vremya atmosfernogo perenosa vozdushnyh mass [Spore-forming bacteria isolated from aerosols of air in the south of Western Siberia, during atmospheric transfer of air masses]. In: *Vestnik Nizhnevartovskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2018 (3), pp. 123–130. (In Russian).

Ashmarin, I.P., & Vorobyov, A.A. *Statisticheskie metody v mikrobiologicheskikh issledovaniyakh* [Statistical Methods in Microbiological Studies]. Leningrad: Medgiz, 1962, 180 p. (In Russian).

Metody obshchey bakteriologii [Manual of Methods for General Bacteriology]. Ed. by P. Gerhardt, R.G.E. Murray, R.N. Costilow, E.W. Nester, W.A. Wood, N.R. Krieg, G.B. Phillips. Moscow: Mir, 1984, vol. 3. (In Russian).

Opredelitel bakterij Berdzhii [Bergey's Manual of Systematic Bacteriology]. Ed. by J.G. Holt. Moscow: Mir, 1997. (In Russian).

Safatov, A.S., Buryak, G.A., Olkin, S.E., Reznikova, I.K., Makarov, V.I., & Popova, S.A. Monitoring kontsentratsiy organicheskogo / neorganicheskogo ugleroda i summarnogo belka v aerole prizemnogo sloya atmosfery yuga Zapadnoy Sibiri [Monitoring data on organic/elemental carbon and total protein in ground air layer aerosol in the south of Western Siberia]. In: *Optika Atmosfery i Okeana*, 2014 (27), issue 2, pp. 164–168. (In Russian).

Sergeev, A.N., Safatov, A.S., Agafonov, A.P., Andreeva, I.S., Arshinov, M.Yu., Belan, B.D., Buryak, G.A., Generalov, V.M., Zakharova, Yu.R., Lapteva, N.A., Olkin, S.E., Panchenko, M.V., Parfenova, V.V., Reznikova, I.K., Simonenkov, D.V., Tepyakova, T.V., & Ternovoi, V.A. Sravneniye prisutstviya khimicheskikh i biologicheskikh markerov v poverkhnostnom mikrosloye vody akvatoriy kurortnykh zon ozera Baykal i v atmosfernom aerole etogo regiona [Comparison of the presence of chemical and biological markers in the surface microlayer in water areas of

health resort zones of Lake Baikal and in atmospheric aerosol of this region]. In: *Optika Atmosfery i Okeana*, 2009(22), issue 4, pp. 467–477. (In Russian).

Bertolini, V., Gandolfi, I., Ambrosini, R., Bestetti, G., Innocente, E., Rampazzo, G., & Franzetti, A. Temporal variability and effect of environmental variables on airborne bacterial communities in an urban area of Northern Italy. In: *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2013 (59), pp. 177–183. doi: 10.1007/s00253-012-4450-0.

Bowers, R., McCubbin, I., Hallar, A., & Fierer, N. Seasonal variability in airborne bacterial communities at a high-elevation site. In: *Atmospheric Environment*, 2012 (50), pp. 41–49.

Bowers, R., McLetchie, S., Knight, R., & Fierer, N. Spatial variability in airborne bacterial communities across land-use types and their relationship to the bacterial communities of potential source environments. *ISME Journal*, 2011a (5), pp. 601–612. doi: 10.1038/ismej.2010.167.

Bowers, R., Sullivan, A., Costello, E., Collett, J., Knight, R., & Fierer, N. Sources of bacteria in outdoor air across cities in the Midwestern United States. In: *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2011b (77), pp. 6350–6356. doi: 10.1128/AEM.05498-11.

Burrows, S., Elbert, W., Lawrence, M., & Pösch, U. Bacteria in the global atmosphere – Part 1: Review and synthesis of literature data for different ecosystems. In: *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009 (9), pp. 9263–9280. doi.org/10.5194/acp-9-9263-2009.

Burrows, S., Butler, T., Jöckel, P., Tost, H., Kerkweg, A., Pöschl, U., & Lawrence, M. Bacteria in the global atmosphere - Part 2: Modeling of emissions and transport between different ecosystems. In: *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009 (9), issue 23, pp. 9281–9297.

Fang, Z., Ouyang, Z., Zheng, H., Wang, X., & Hu, L. Culturable airborne bacteria in outdoor environments in Beijing, China. In: *Microbial Ecology*, 2007 (54), pp. 487–496. doi:10.1007/s00248-007-9216-3.

Hara, K., & Zhang, D. Bacterial abundance and viability in long-range transported dust. In: *Atmospheric Environment*, 2012 (47), pp. 20–25.

Kakikawa, M., Kobayashi, F., Maki, T., Yamada, M., Higashi, T., Chen, B., Shi, G., Hong, C., Tobo, Y., & Iwasaka, Y. Dustborne microorganisms in the atmosphere over an Asian dust source region, Dunhuang. In: *Air Quality, Atmosphere, and Health*, 2008 (1), issue 4, pp. 195–202. doi:10.1007/s11869-008-0024-9.

Lighthart, B. The ecology of bacteria in the alfresco atmosphere. In: *FEMS Microbiology Ecology*, 1997 (23), issue 4, pp. 263–274. doi: 10.1111/j.1574-6941.1997.tb00408.x.

Lighthart, B., & Shaffer, B. Bacterial flux from chaparral into the atmosphere in mid-summer at a high desert location. In: *Atmospheric Environment*, 1994 (28), issue 7, pp. 1267–1274.

Lighthart, B., & Shaffer, B.T. Airborne bacteria in the atmospheric surface layer: temporal distribution above a grass seed field. In: *Applied and Environmental Microbiology*, 1995 (61), pp. 1492–1496.

Maki, T., Kakikawa, M., Kobayashi, F., Yamada, M., Matsuki, A., Hasegawa, H., & Iwasaka, Y. Assessment of composition and origin of airborne bacteria in the free troposphere over Japan. In: *Atmospheric Environment*, 2013 (74), pp. 73–82.

Maron, P., Mougél, C., Lejon, D.P.H., Carvalho, E., Bizet, K., Marck, G., Cubito, N., Lemanceau, P., & Ranzard, L. Temporal variability of airborne bacterial community structure in an urban area. In: *Atmospheric Environment*, 2006 (40), pp. 8074–8080.

Matthias-Maser, S., Obolkin, V., Khodzer, T., & Jaenicke, R. Seasonal variation of primary biological aerosol particles in the remote continental region of Lake Baikal/Siberia. In: *Atmospheric Environment*, 2000 (34), pp. 3805–3811.

Pearce, D., Bridge, P., Hughes, K., Sattler, B., Psenner, R., & Russell, N. Microorganisms in the atmosphere over Antarctica. In: *FEMS Microbiology Ecology*, 2009 (69), pp. 143–157. doi:10.1111/j.1574-6941.2009.00706.x.

Ravva, S., Hernlem, B., Sarreala, C., & Mandrella, R. Bacterial communities in urban aerosols collected with wetted-wall cyclonic samplers and seasonal fluctuations of live and culturable airborne bacteria. In: *Journal of Environmental Monitoring*, 2012 (14), issue 2, pp. 473–481.

Shaffer, T., & Lighthart, B. Survey of Culturable Airborne Bacteria at Four Diverse Locations in Oregon: Urban, Rural, Forest, and Coastal. In: *Microbial Ecology*, 1997 (34), issue 3, pp. 167–177.

Tong, Y., & Lighthart, B. Diurnal distribution of total and culturable atmospheric bacteria at a rural site. In: *Aerosol Science and Technology*, 1999 (30), pp. 246–254. doi:10.1080/027868299304822.

Tong, Y., & Lighthart, B. The annual bacterial particle concentration and size distribution in the ambient atmosphere in a rural area of the Willamette Valley, Oregon. In: *Aerosol Science and Technology*, 2000 (32), pp. 393–403. doi:10.1080/027868200303533.

Williams, J., De Reus, M., Krejci, R., Fischer, H., & Ström, J. Application of the variability-size relationship to atmospheric aerosol studies: estimating aerosol lifetimes and ages. In: *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2002 (2), pp. 133–145. doi:10.5194/acp-2-133-2002.

Womack, A., Bohannan, J., & Green, J. Biodiversity and biogeography of the atmosphere. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2010 (365), pp. 3645–3653. doi.org/10.1098/rstb.2010.0283.

Xu, C., Wei, M., Chen, J., Sui, X., Zhu, C., Li, J., Zheng, L., Sui, G., Li, W., Wang, W., Zhang, O., & Mellouki, A. Investigation of diverse bacteria in cloud water at Mt. Tai, China. In: *Science of the Total Environment*, 2017 (580), issue 15, pp. 258–265.

Xu, C., Wei, M., Chen, J., Zhu, C., Li, J., Xu, X., Wang, W., Zhang, Q., Ding, A., Kan, H., Zhao, Z., & Mellouki, A. Profile of inhalable bacteria in PM_{2.5} at Mt. Tai, China: Abundance, community, and influence of air mass trajectories. In: *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019 (168), pp. 110–119.

I.S. Andreeva, A.S. Safatov, L.I. Puchkova, E.K. Emelyanova,
G.A. Buryak, S.E. Olkin, I.K. Reznikova, O.V. Ohlopko
Koltsovo, Novosibirsk, Russia

CULTURABLE MICROORGANISMS IN HIGH-ALTITUDE ATMOSPHERIC AEROSOL SAMPLES COLLECTED ABOVE NORTHERN SIBERIA BY AIRCRAFT SOUNDING

Abstract. To contribute to the comprehensive study of atmospheric pollution in Siberia, aircraft sounding was carried out in Northwestern Siberian along the following route: Novosibirsk – Surgut – Igarka – Novosibirsk. This work was aimed at studying the quantity and representation of culturable microorganisms and other biogenic components of the atmosphere at altitudes up to 8,000 m. The air samples were collected to impingers (flow rate 50 ± 5 L/min) where 50 ml of Hanks' solution (ICN Biomedicals) was used as the sorbing liquid and applied on the fibrous filters. The concentration of biogenic material was recorded, and the concentration and diversity of culturable microorganisms were determined in total protein samples. It was found that the samples of atmospheric air contained 158 mesophilic and psychrophilic microorganisms represented by such genera as *Micrococcus*, *Staphylococcus*, *Bacillus*, *Nocardia*, *Arthrobacter*, and *Rhodococcus*. Also, Actinomycete, yeast and fungal cultures were also isolated. Non-sporiferous bacteria were widely presented at all altitudes. Enzymatic activity of the isolated microorganisms and a number of pathogenicity factors present were investigated. The data on quantity and representation of culturable microorganisms and other biogenic components at altitudes up to 8000 m in Northwestern Siberia were obtained for the first time. It is a significant contribution to the study of the atmosphere of this region. The patterns of the observed biodiversity of microorganisms, associated with the sampling altitude or geographic location, should be determined in further research.

Key words: atmosphere; bioaerosol; atmospheric aerosol; culturable microorganism; enzymatic activity; Siberia; Eurasia; North.

About the authors: Irina Sergeevna Andreeva¹, Candidate of Biological Sciences (PhD), Associate Professor, Leading Researcher; Alexander Sergeevich Safatov², Doctor of Technical Sciences, Head of Department; Larisa Ivanovna Puchkova³, Candidate of Biological Sciences (PhD), Leading Researcher; Elena Konstantinovna Emelyanova^{4,5}, Candidate of Biological Sciences (PhD), Senior Researcher, Associate Professor at the Department of Hygiene and Ecology; Galina Alekseevna Buryak⁶, Researcher; Sergei Evgenyevich Olkin⁷, Leading Researcher; Irina Konstantinovna Reznikova⁸, Senior Researcher; Olesya Viktorovna Ohlopko⁹, Junior Researcher.

Place of employment: ^{1-4,6-9}State Research Center of Virology and Biotechnology "Vector" of Rospotrebnadzor; ⁵Novosibirsk State Medical University.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке проекта YAK-Sib 2017 (CNRS, France) и Государственного задания Роспотребнадзора 14/18.

Андреева И.С., Сафатов А.С., Пучкова Л.И., Емельянова Е.К., Буряк Г.А., Олькин С.Е., Резникова И.К., Охлопкова О.В. Культивируемые микроорганизмы в высотных пробах аэрозолей воздуха севера Сибири в ходе самолетного зондирования атмосферы // Вестник Нижневартовского государственного университета. 2019. № 2. С. 3–11.

Andreeva I.S., Safatov A.S., Puchkova L.I., Emelyanova E.K., Buryak G.A., Olkin S.E., Reznikova I.K., Ohlopko O.V. Culturable microorganisms in high-altitude atmospheric aerosol samples collected above northern Siberia by aircraft sounding // Bulletin of Nizhnevartovsk State University. 2019. No. 2. P. 3–11.

УДК: 579.243, 581.14

Е.Ю. Езунова, М.Ю. Шарипова, Ш.Р. Абдуллин
г. Уфа, Россия

ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ТРЕХ ШТАММОВ ЦИАНОБАКТЕРИЙ *NOSTOC CF. PUNCTIFORME VAUCH*

Аннотация. Представлены результаты исследования жизненного цикла трех штаммов (Пк20ж, Чх55 и Св31ж) нитчатой азотфиксирующей цианобактерии *Nostoc cf. punctiforme* Vauch. Широкое распространение данных микроорганизмов, высокий адаптационный потенциал, неприхотливость к условиям искусственного культивирования, высокие темпы роста и особенности физиолого-биохимических процессов (способность к оксигенному фотосинтезу, азотфиксации и др.) определяют успешность их выбора в качестве биотехнологического объекта. Исследование свойств вида *Nostoc cf. punctiforme* и его дальнейшее возможное использо-