

УДК 551.464.6.027 556.12 556.114

Ю.Н. Чижова¹, Н.А. Буданцева², Л.Е. Ефимова³,
А.Н. Лукьянова⁴, Г.В. Суркова⁵, Ю.К. Васильчук⁶

ИЗОТОПНО-КИСЛОРОДНЫЙ СОСТАВ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ И ВОДЫ В РЕЧНОЙ СИСТЕМЕ СРЕДНЕЙ ПРОТВЫ⁷

Выполнено изотопное исследование формирования речного стока с участием атмосферных осадков и грунтовых вод в среднем течении р. Протва в пределах Сатинского учебно-научного полигона географического факультета с использованием изотопного анализа воды. Определения изотопно-кислородного состава выполнялись в лаборатории географического факультета МГУ на масс-спектрометре "Delta-V" со стандартной опцией газ-бенч. Зафиксировано кратковременное изотопное влияние атмосферных осадков на изотопный состав воды р. Протва, установлено происхождение летних осадков, рассмотрены причины выпадения аномально изотопно тяжелых дождей.

Ключевые слова: изотопный состав природных вод, аномальный изотопный состав атмосферных осадков.

Введение. Вариации и соотношение стабильных изотопов кислорода и водорода, существующие в природе, характеризуют процессы конденсации влаги, испарения и смешения вод разного генезиса. Поскольку молекула воды $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$ более летуча при испарении и конденсации, то жидкая фаза обогащается ^2H и ^{18}O , а парообразная обедняется. В качестве эталона для оценки концентрации ^2H (D) и ^{18}O используется SMOW — стандарт среднеокеанической воды, который отвечает абсолютному содержанию дейтерия (0,01985‰) и тяжелого кислорода (0,1985‰).

Концентрации дейтерия и тяжелого кислорода измеряются в виде отклонения от стандарта, приравненного к нулю, и оцениваются как отношение (δ), ‰. Атмосферные, речные и подземные воды имеют отрицательный изотопный состав, т.е. изотопно легче стандарта среднеокеанской воды. Высокое содержание ^2H и ^{18}O свойственно метеорным водам тропических широт, где оно приближается к значениям океанской воды ($\delta^{18}\text{O}$ близко к нулю). Намного ниже концентрация тяжелых изотопов в метеорных водах умеренного пояса, а самая низкая — в атмосферных осадках и льдах полярных областей.

Поскольку главной причиной образования осадков служит охлаждение атмосферных водяных паров, существует зависимость между содержанием стабиль-

ных изотопов в осадках и температурой. В реальной атмосфере конденсация пара никогда не происходит в изотермических условиях. Любое формирование осадков обязательно вызвано каким-либо видом охлаждения пара в облаках. Наблюдаемый изотопный состав каждого снегопада или дождя зависит от термодинамических условий в процессе охлаждения и изначального изотопного состава источника пара. В тропических районах круглогодично, а в умеренных широтах в теплые сезоны наблюдается обратная корреляция между содержанием ^{18}O и ^2H и количеством выпадающих осадков, т.е. значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ относительно низкие в дождливые месяцы и относительно высокие в те месяцы, когда дожди редки [3].

Постановка проблемы. Нами была поставлена задача определить изотопный состав атмосферных осадков и речной воды в летний сезон на Сатинском учебно-научном полигоне географического факультета МГУ, оценить различия в изотопном составе грунтовых, речных, атмосферных и вод ручьев, выявить влияние изотопно тяжелых дождей в речной воде, установить происхождение воздушных масс, приносящих изотопно тяжелые осадки. Представленные в статье материалы — первые данные об их изотопии в районе Сатинского учебно-научного полигона, их можно будет использовать в дальнейшем при поста-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, ст. науч. с., канд. геогр. н.; e-mail: eacentr@yandex.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, ст. науч. с., канд. геогр. н.; e-mail: nadin.budanceva@mail.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, ст. науч. с., канд. геогр. н.; e-mail: ef_river@mail.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, инженер; e-mail: lan22-66-88@mail.ru

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра метеорологии и климатологии, доцент, канд. геогр. н.; e-mail: sgalina@mail.ru

⁶ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, профессор, докт. геол.-минер. н.; e-mail: vasilch@geol.msu.ru

⁷ Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (гранты 10-05-00986 и 11-05-01141) и Министерства образования и науки Российской Федерации (госконтракт № 8339).

новке научных и учебных задач по гидрологическому режиму и гидрохимии.

В химическом составе воды р. Протва обнаружена пространственная и сезонная неоднородность. В речном стоке при смене одной фазы водного режима другой меняется не только расход воды, но и соотношение объема вод различного происхождения. Поверхностно-склоновые, почвенные, грунтовые воды первого и второго водоупорных горизонтов, подземные воды, формирующиеся на коренных породах, смешиваясь в разных пропорциях в отдельные фазы водного режима, обуславливают внутригодовое изменение химического состава. Использование изотопного маркера этих процессов может послужить дополнительным инструментом в балансовых и гидрохимических исследованиях на Сатинском полигоне.

Питание р. Протва смешанное, с преобладанием снегового при значительном участии подземного и дождевого. Поверхностные воды по составу гидрокарбонатно-кальциевые, с минерализацией 400–450 мг/л, рН варьирует от 7,7 в роднике под дер. Дедюевка до 8,25 в р. Исьма.

Водный режим р. Протва изменчив от года к году, но его основные фазы выражены отчетливо в любом году: высокое весеннее половодье, низкие летняя и зимняя межень, повышенный сток осенью. Средне-многолетний среднегодовой расход р. Протва, рассчитанный для гидрологического поста у с. Спас-Загорье, составляет 21 м³/с [5].

Речная сеть в бассейне р. Протва хорошо развита, но на отрезке в среднем течении в пределах Сатинского полигона река практически бесприточна. Ниже с. Сатино в Протву впадает слева один из шести самых крупных притоков — р. Исьма, ее длина 35 км. По данным сотрудника НИЛ ЭПиРП И.В. Крыленко, расход воды в р. Исьма в летнюю и зимнюю межень составляет около 10% от среднееголетнего меженного стока Протвы.

Речная сеть представлена не только реками, но и многочисленными ручьями, временными, функционирующими только в период повышенного стока и дренирующими воды первого водоупорного горизонта (Волчий, Барсучий и др.), а также постоянными, которые имеют сток круглый год и питаются грунтовыми водами из второго водоупорного горизонта и коренных пород (ручьи Западно- и Восточно-Сатинские, Егоров и др.). По данным И.В. Крыленко, расходы ручьев даже на пике половодья очень невелики. Расходы воды в Егоровом, Западно- и Восточно-Сатинских ручьях примерно одинаковы и составляют 0,005–0,600 м³/с, в зависимости от фазы режима и водности года. Временные ручьи имеют значительно меньший расход, в межень они практически исчезают или теряются в пойменных отложениях. Сток каждого оврага не превышает 0,1% от стока Протвы. Но суммарное поступление вод из постоянных ручьев может достигать нескольких процентов и влиять на термический и химический режим реки.

Материалы и методы исследований. Отбор дождевой, речной и воды из ручьев осуществляли в июле 2009, 2010 и 2011 гг. в пределах Сатинского учебно-научного полигона географического факультета МГУ (рис. 1).

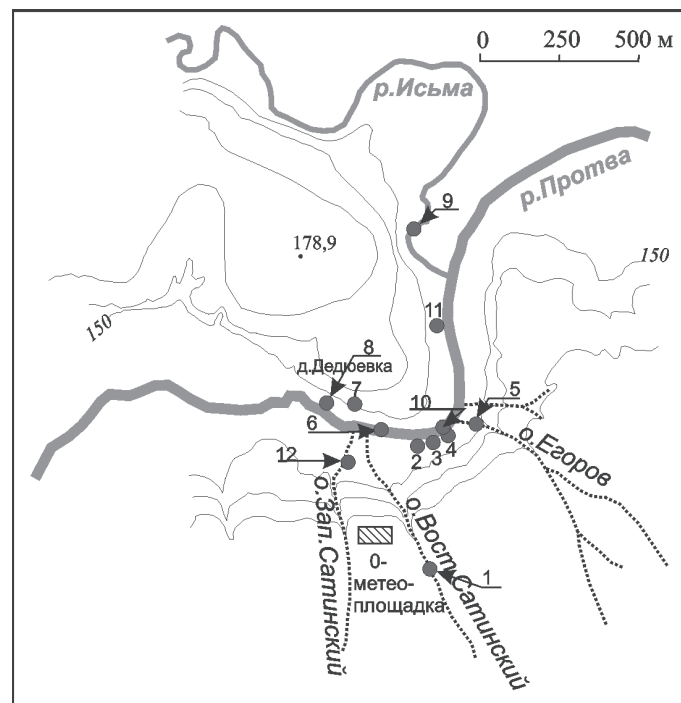


Рис. 1. Схема расположения точек отбора образцов. Номера точек опробования указаны в табл. 1

В летний сезон 2009 г. отобраны серии проб воды из р. Протва и впадающих в нее ручьев с разным времем. После сильной грозы (27.07.2009), которая продолжалась с 0 до 2 ч. ночи, отобраны пробы на правом берегу из водотоков глубокого вреза — Восточно-Сатинского, Егорова оврагов, выходы вод из-под Бутковского холма (дренируют коренные карбонатные породы), воды поверхностного стока в ложбине на пойме и в Протве на стремнине через 3, 12 и 28 ч после прекращения выпадения осадков. Через 10 и 28 ч после грозы отобраны пробы воды на левом берегу из родника под дер. Дедюевка (водоупор — днепровские суглинки) и из р. Исьма (небольшой врез, заболоченная пойма).

Летом 2010 г. отобраны пробы воды в тех же водотоках: в роднике под дер. Дедюевка, из р. Исьма и ручейка из-под Дедюевского холма на пойме, в Егоровом овраге и из р. Протва. Поскольку лето было очень жарким и осадков было мало, то отобранные пробы отражают гидрохимический состав глубокой межени. Кроме того, отобраны пробы в этих водотоках после двух дождей 30.06 и 27.07.2010 через 5 ч после окончания дождя.

В 2011 г. отобраны 3 пробы атмосферных осадков (2, 5 и 7 июля) и пробы воды из р. Протва и ручья в Западно-Сатинском овраге в течение первых часов после выпадения осадков.

Все образцы атмосферных осадков (дождевой воды) отбирали на метеорологической площадке по стандартной методике. Образцы речной и дождевой воды отбирали в стерильные флаконы объемом 50 мл, без консервации, в течение 7 дней их доставляли в лабораторию и до момента анализа хранили в холодильной камере.

Пробы анализировали в изотопной геохимической лаборатории географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова на масс-спектрометре "Delta-V" со стандартной опцией газ-бенч по стандартным методикам. Точность измерений на приборе составляет $\pm 0,04\text{‰}$ по $\delta^{18}\text{O}$. При измерении $\delta^{18}\text{O}$ анализируемые образцы воды уравнивались с CO_2 в течение 24 ч. Для измерений использован международный стандарт среднеокеанской воды SMOW-V и лабораторные стандарты МАГАТЭ, а также изотопной лаборатории Австрийского технологического института.

Результаты исследований и их обсуждение. Изотопно-кислородный состав р. Протва варьирует в пределах -10‰ – -11‰ , грунтовые воды, выход которых находится в роднике под дер. Дедюевка характеризуются значениями $\delta^{18}\text{O}$ от -12 до -13‰ (табл. 1). В атмосферных осадках, выпадавших в середине лета 2009 и 2011 гг., значения $\delta^{18}\text{O}$ варьировали от $-4,15$ до $-7,73\text{‰}$, а в июле 2010 г. в районе Сатина выпал аномальный изотопно-тяжелый дождь со значением $\delta^{18}\text{O}$ около нуля.

Изотопное влияние грозовых осадков, выпавших ночью 27 июля 2009 г. с изотопным составом $\delta^{18}\text{O}$, равным $-7,35\text{‰}$ (табл. 1), отразилось в составе поверхностных вод в районе Сатинского учебного полигона: в течение дня изотопный состав в р. Протва и ручьях Егоров и Восточно-Сатинский постепенно облегчался (рис. 2). Грунтовые воды на полигоне характеризуются значениями $\delta^{18}\text{O} = -13,0\text{‰}$ (родник под дер. Дедюевка). Во время грозы в ночь 26–27 июля 2009 г. в Сатине за три часа выпало около 1/4 месячной нормы осадков.

Построенные по результатам полулагранжевой модели переноса HYSPLIT [10, 16] обратные (на 3 сут.) траектории воздушных масс в нижней части тропосферы, где перемещается основная масса влагонесущего потока, свидетельствуют о возможности влияния морского атлантического воздуха на изотопный состав осадков (рис. 3, а). Один из центров низкого давления, образовавшийся на несколько дней раньше над Северной Атлантикой и через Великобританию и Скандинавию переместившийся к центру европейской территории России (ЕТР), вызвал дожди и грозы над ней. Осадки вдоль траекторий переноса выпадали преимущественно в последние сутки до прихода воздушной массы в район Сатина и количество их было невелико. По составу дожди в июле 2009 г. были в основном хлоридно-магниевого с минерализацией 15–65 мг/л, рН дождевых вод колебался в пределах 4,8–6,8 (табл. 2).

Таблица 1

Значения $\delta^{18}\text{O}$ в атмосферных осадках, речных и поверхностных водах в районе Сатинского полигона (отбор А.Н. Лукьяновой)

Номер точки-год-номер образца	Место и время отбора	$\delta^{18}\text{O}$, ‰
2009 г.		
27.07.2009		
1-09-1	Восточно-Сатинский овраг, ручей, 5:30	-12,23
2-09-2	Ручеек на лугу между Восточно-Сатинским оврагом и Егоровым оврагом, 6:25	-11,6
3-09-3	Ложбина возле луга, 6:40	-12,05
4-09-4	Поверхностный сток между ложбиной и Егоровым оврагом, 6:50	-12,2
5-09-5	Егоров овраг, ручей, 7:00	-12,07
6-09-6	Вода р. Протва у моста, 7:15	-11,05
7-09-7	Выход вод в луже под дер. Дедюевка, 13:00	-12,9
8-09-8	Вода, родник под дер. Дедюевка, 13:15	-12,88
9-09-9	Вода р. Исьма, 200 м от устья, 13:45	-11,31
1-09-10	Восточно-Сатинский овраг, ручей, 17:50	-12,34
3-09-11	Ложбина за лугом, 18:20	-12,3
4-09-12	Болотце между ложбиной и Егоровым оврагом	-12,27
5-09-13	Егоров овраг, ручей, 18:35	-12,18
6-09-14	Вода р. Протва у моста 18:50	-11,15
0-09-15	Осадки, гроза, 0:30–3:00	-7,35

Окончание табл. 1

Номер точки-год-номер образца	Место и время отбора	$\delta^{18}\text{O}$, ‰
28.07.2009		
8-09-16	Родник под дер. Дедюевка, 13:10	-13,1
9-09-17	Вода р. Исьма, 200 м от устья, 13:40	-11,65
1-09-18	Восточно-Сатинский овраг, ручей, 19:00	-12,56
3-09-19	Ложбина у луга, 19:20	-12,31
5-09-20	Егоров овраг, ручей, 19:30	-12,23
6-09-21	Вода р. Протва у моста, 19:40	-11,24
2010 г.		
27.06.2010		
8-10-1	Родник под дер. Дедюевка, период без дождя более 3 дней	-12,31
9-10-2	Р. Исьма, 200 м выше устья	-10,85
5-10-3	Вода ручья в Егоровом овраге	-11,27
10-10-4	Р. Протва выше Егорова оврага	-10,74
29.06.2010		
5-10-5	Егоров овраг после дождя	-11,40
10-10-6	Р. Протва	-10,49
9-10-7	Р. Исьма	-11,20
11-10-8	Вода ручья из-под Дедюевского холма не доходя до р. Исьма	-12,01
8-10-9	Родник под дер. Дедюевка	-12,11
26.07.2010		
0-10-10	Дождевая вода, ливень после 2 недель засухи	0,05
5-10-11	Егоров овраг	-11,30
10-10-12	Р. Протва	-10,69
9-10-13	Р. Исьма	-11,20
11-10-14	Ручей из-под Дедюевского холма	-12,11
2011 г.		
02.07.2011		
0-11-1	Дождь	-4,15
03.07.2011		
12-11-2	Ручей, Западно-Сатинский овраг.	-11,90
6-11-3	Р. Протва	-10,66
0-11-4	Дождь с 4.07 на 5.07	-6,15
05.07.2011		
12-11-5	Ручей, Западно-Сатинский овраг, 10:30	-11,50
6-11-6	Р. Протва в 10:30	-10,22
12-11-7	Ручей, Западно-Сатинский овраг, 12:30	-11,60
6-11-8	Р. Протва, 12:30	-10,86
07.07.2011		
0-11-9	Гроза с 13 до 14 ч.	-7,73
12-11-10	Ручей, Западно-Сатинский овраг, 14:00	-11,45
12-11-11	Там же, 15:00	-11,59
12-11-12	Там же, 16:00	-11,62
12-11-13	Там же, 17:00	-10,83
12-11-14	Там же, 18:00	-11,09

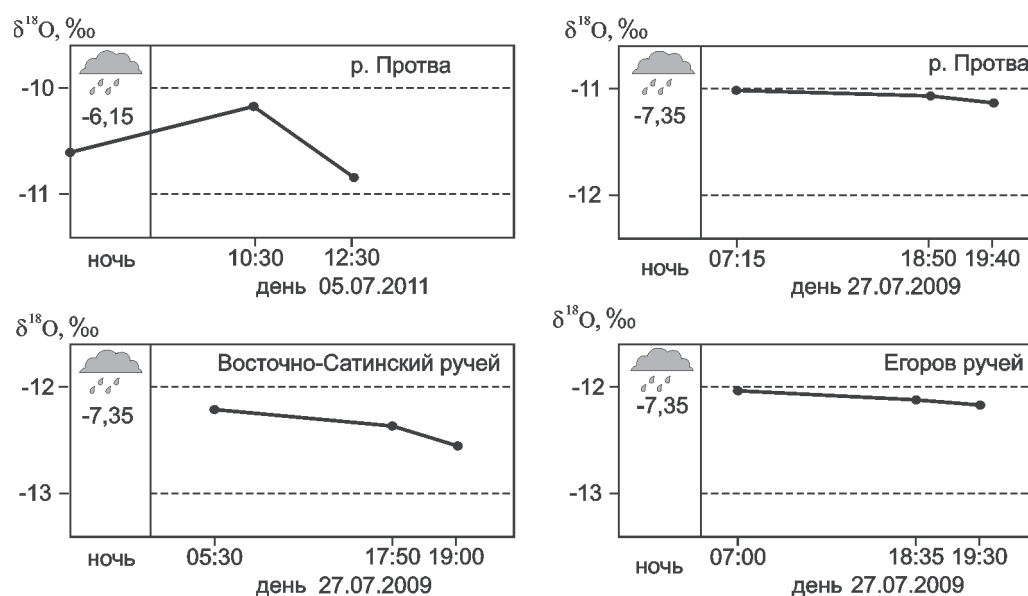


Рис. 2. Изменение изотопного состава поверхностных вод в районе Сатино в течение суток после выпадения изотопно-тяжелого дождя

Таблица 2

Химический состав дождевой воды в районе Сатинского полигона

Дата отбора пробы	Единицы	HCO_3	SO_4	Cl	Ca	Mg	Na	K	Сумма ионов
Дождь, 25.07.2009	мг/л	0,0	2,27	28,61	9,22	5,66	0,39	1,18	47,33
	%-экв/л	0,00	2,59	44,14	25,19	25,49	0,94	1,65	100,00
Дождь, 27.07.2009	мг/л	16,170	1,24	2,04	2,04	2,97	0,10	0,18	24,74
	%-экв/л	37,68	3,67	8,17	14,48	34,73	0,63	0,64	100,000
Ливень, 26.07.2010	мг/л	20,76	2,71	166,90	40,85	14,69	0,61	4,00	200,14
	%-экв/л	4,02	0,35	55,69	24,1	14,3	0,314	1,213	100,00
Дождь, 02.07.2011	мг/л	0	3,84	79,95	28,14	7,04	0,60	1,22	124,16
	%-экв/л	0,0	1,81	50,87	31,7	13,1	0,6	0,7	100,00
Дождь, 04—05.07.2011	мг/л	0,00	1,52	25,95	6,74	3,25	0,20	0,84	39,33
	%-экв/л	0,0	2,22	51,34	23,62	18,80	0,61	1,51	100,00
Дождь, 05.07.2011	мг/л	0,00	1,51	5,59	2,08	1,26	0,00	0,32	12,30
	%-экв/л	0,00	7,32	36,66	24,16	24,16	0,00	1,91	100,00
Гроза, 07.07.2011	мг/л	0,00	3,72	8,31	2,08	1,26	0,00	0,84	17,56
	%-экв/л	0,00	13,78	41,6	18,5	18,4	0,0	3,8	100,00

Выпадение аномально изотопно тяжелого дождя 26.07.2010 со значением $\delta^{18}\text{O} = 0,05\text{‰}$ (табл. 1) никак не отразилось на изотопном составе рек Исьма и Протва, значения $\delta^{18}\text{O}$ в которых остались стабильными как до дождя, так и после него. В воде р. Исьма $\delta^{18}\text{O} = -11,20\text{‰}$, в воде р. Протва значение $\delta^{18}\text{O}$ составляло от $-10,49$ до $-10,69\text{‰}$. Воздушная масса,

давшая осадки 26 июля, до этого длительное время была малоподвижна, особенно в нижней атмосфере, и медленно перемещалась над ЕТР в пределах крупномасштабного антициклона, определявшего очень жаркую и сухую погоду. Даже на высоте около 3 км и более температура воздуха была положительна вдоль всей траектории антициклона. Траектории воздуш-

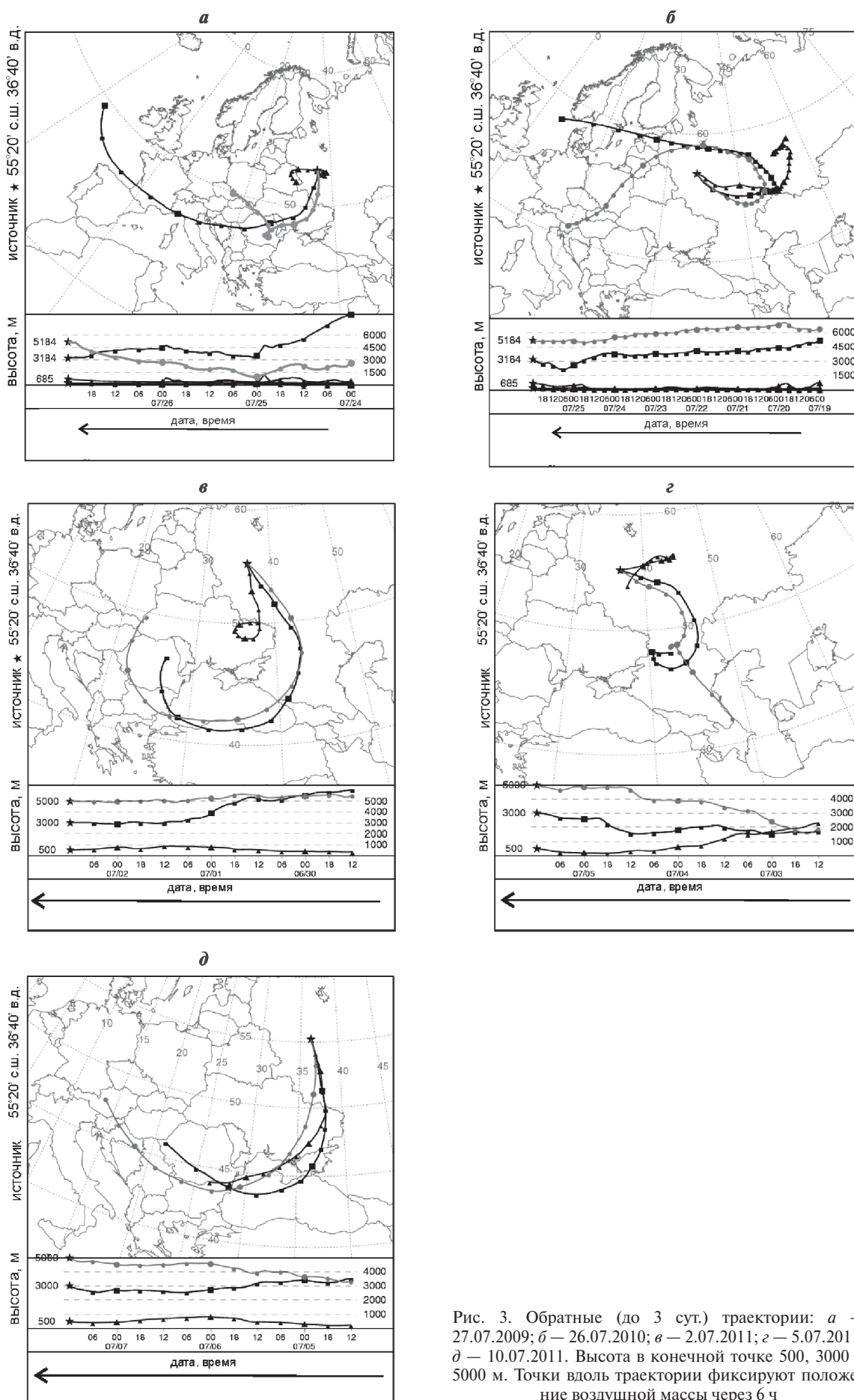


Рис. 3. Обратные (до 3 сут.) траектории: а — 27.07.2009; б — 26.07.2010; в — 2.07.2011; г — 5.07.2011; д — 10.07.2011. Высота в конечной точке 500, 3000 и 5000 м. Точки вдоль траектории фиксируют положение воздушной массы через 6 ч

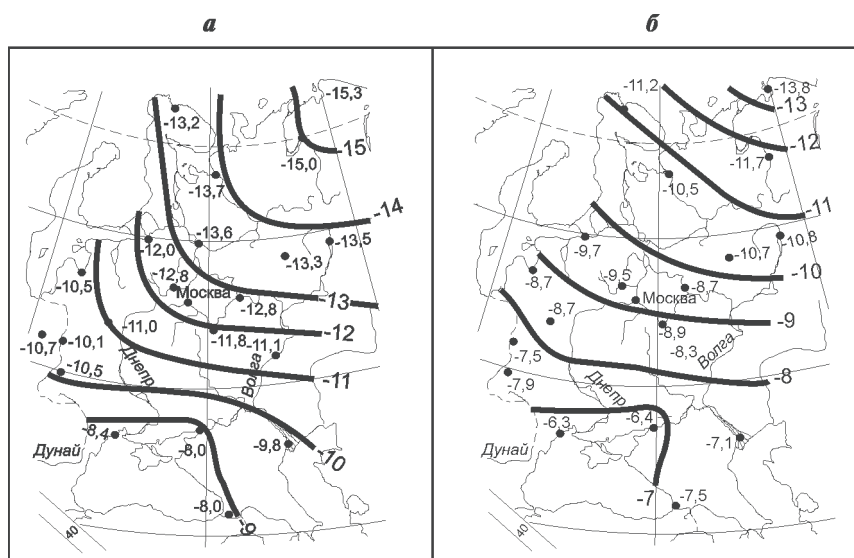


Рис. 4. Распределение стабильных изотопов в атмосферных осадках европейской территории России: среднегодовые значения $\delta^{18}\text{O}$ (а) и значения $\delta^{18}\text{O}$ в летних дождях (б), по [1]

ной массы дают основание говорить о возможном влиянии воздуха Атлантики на изотопный состав водяного пара этой воздушной массы (рис. 3, б). Осадки вдоль траектории за последние 7 сут. до прихода воздуха в район исследований не отмечались. Водяной пар, поступивший в атмосферу с поверхности океана, мог не подвергаться конденсации на протяжении всего пути, так как воздух оставался ненасыщенным.

В химическом составе дождевой воды преобладал хлор-ион (табл. 2), что свидетельствует о морском происхождении воздушных масс, увеличение содержания аммония и высокое значение рН вызвано вымыванием из атмосферы продуктов горения болот, когда в Подмоскowie в течение двух летних месяцев происходило сильное задымление.

Изотопное влияние ливневых осадков в 2011 г. в изотопном составе р. Протва отразилось в слабой реакции речной воды на изотопно тяжелый дождь со значением $\delta^{18}\text{O} = -6,15\text{‰}$, выпавший с 4 на 5 июля 2011 г. Построенные обратные траектории воздушных масс свидетельствуют (рис. 3, в, г, д) о возможности существенного влияния вод Черного (5 июля) и Каспийского морей на содержание стабильных изотопов кислорода и водорода в атмосферной влаге. Многоцентровой окклюдируемый циклон с центром над Восточной Европой на несколько дней раньше (26–28 июня) стал причиной необычайно сильного для лета шторма в Черном море, сопровождавшегося большой скоростью ветра. В последующие дни циклон постепенно заполнялся, и его центр перемещался в северо-западном направлении на Восточную Европу. В связи с активным развитием конвекции в дневное время многие осадки носили ливневый характер, как это было 2, 5 и 7 июля 2011 г. в районе исследований. Преобладание хлор-иона в дождевой воде (табл. 2) также свидетельствует о морском происхождении воздушной массы.

Влияние дождевых осадков в речной воде прослеживалось в течение 2 ч. 5 июля, когда значение $\delta^{18}\text{O}$ в р. Протва уменьшилось на $0,6\text{‰}$ (табл. 1, рис. 2, а). В целом значения $\delta^{18}\text{O}$ в р. Протва составили в июле 2009 г. около -11‰ , а в 2010 и 2011 гг. были несколько тяжелее (около $-10,5\text{‰}$), что, вероятно, связано с большим испарением речной воды в эти сезоны. Воды ручьев несколько изотопно легче воды р. Протва (в основном на 1‰), что отражает вскрытие оврагами водоносных горизонтов и грунтовое питание ручьев.

В течение 3 лет в летний сезон на территории Сатинского полигона выпадали изотопно тяжелые дожди. Для территории центра европейской части России характерными значениями $\delta^{18}\text{O}$ в летних дождях можно считать -8‰ – -10‰ (рис. 4, б), значения же -4‰ – -6‰ чаще отмечаются в тропических районах [15], хотя средние многолетние значения $\delta^{18}\text{O}$ в летних осадках в г. Вена варьируют от -4 до -10‰ [17]. Можно сказать, что осадки в центральной части Восточно-Европейской равнины могут иметь разное происхождение. Так, значения $\delta^{18}\text{O} = -7\text{‰}$ – -8‰ скорее свидетельствуют об атлантическом влиянии, а значения -4‰ – -5‰ — о черноморском.

Происхождение осадков. Одна из трудностей интерпретации изотопного состава дождей заключается в том, что в выпадении осадков (например, атлантических, средиземноморских, континентальных) возможно участие разных воздушных масс, а также влияние локального испарения. Так, в дожде, выпавшем в г. Вена 6–9 августа 1985 г. в течение 3 дней, значение $\delta^{18}\text{O}$ изменялось от -4 до -14‰ , что связано со сменной воздушной массы [14]. На двух альпийских станциях сети МАГАТЭ в июле и августе 1998 г. значения $\delta^{18}\text{O}$ составили $-9,11$ и $-8,41\text{‰}$ на станции Патчеркофель и $-2,30$ и $-8,25\text{‰}$ на станции Виллахер Альпе соответственно. Построение обратных траекторий для этих событий выпадения осадков показало, что

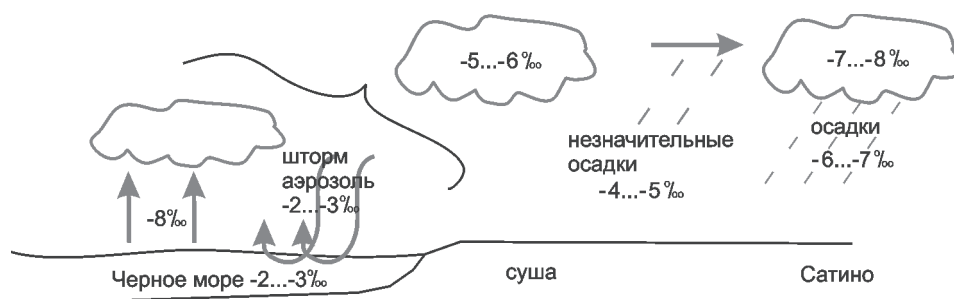


Рис. 5. Идеализованная схема формирования изотопного состава изотопно тяжелых летних осадков в районе Сатинского полигона

аномально высокое значение $\delta^{18}\text{O}$ в июльском дожде на станции Виллахер Альпе связано с разгрузкой воздушной массы, пришедшей со Средиземного моря, в то время как в остальных случаях осадки выпадали из атлантических воздушных масс [14].

Утяжеленный изотопный состав июльских дождей в Сатине, как нам сейчас представляется, можно приблизительно объяснить такой схемой (рис. 5): воздушные массы, формирующиеся над морем, как, например, в 2011 г. над Черным морем, во время активных штормов имеют более тяжелый изотопный состав из-за включения морского аэрозоля, обогащенного тяжелыми изотопными молекулами. В условиях спокойного моря (океана) формирующийся над ним водяной пар имеет значение $\delta^{18}\text{O} = -9\ldots-13\text{‰}$ [9], а усиление изотопного обмена пара с морским аэрозолем (поверхностные воды Черного моря характеризуются значениями $\delta^{18}\text{O}$ около -2‰ [7]) вполне вероятно изотопно утяжеляет воздушную массу. Несмотря на то что концентрация частиц аэрозоля относительно невелика по сравнению с количеством воды в виде пара, очень тяжелый изотопный состав аэрозоля (а также солевых испарений), возможно, заметно влияет на изотопный состав воздушной массы.

Расстояние от Москвы до побережья Черного моря превышает 1 тыс. км. При движении на такое расстояние водонасыщенных воздушных масс и последовательном выпадении из них осадков изотопный состав осадков, как правило, существенно облегчается. По нашим наблюдениям, при последовательном выпадении осадков при переносе воздушной массы с юга на север на 1–1,2 тыс. км уменьшение $\delta^{18}\text{O}$ составляет 6–8‰, а δD уменьшается на 50–60‰ [4]. Поэтому в норме, например, летние осадки вблизи Черноморского побережья, обычно имеющие значения $\delta^{18}\text{O}$ от -5 до -8‰ , в Подмоскovie характеризуются значениями от -9 до -11‰ . В Сатине же воздушные массы приходили с малоизмененным первоначальным изотопным составом.

Испарение осадков. Одна из заметных особенностей выпадения осадков в Сатине в жаркие дни июля 2010 г. после двухнедельной засухи — существенное изотопное обогащение падающих капель дождя, когда осадки выпадали в условиях очень низкой влажности воздуха, что приводило к их заметному испарению. При этом в первую очередь из капель испарялись

изотопно легкие молекулы, как это обычно происходит в любом испарительном цикле. Поэтому, даже выпадая из облака с обычным для Московской области значением $\delta^{18}\text{O}$ около $-8\ldots-9\text{‰}$, в процессе испарения падающих капель из них формировался пар с более отрицательными значениями, а оставшаяся вода в каплях обогащалась до 0‰ . Вследствие высокой степени иссушения атмосферного воздуха испаряющийся из капель пар повторно не конденсировался на падающих каплях, поэтому дождь становился экстремально изотопно тяжелым.

Х. Крейг считает [8], что изотопный состав отдельной капли не является постоянной величиной до тех пор, пока капля не испарится. Сокращение массы капли уменьшает скорость ее падения и испарения, но в то же время удлиняет время ее изотопного обмена с окружающим воздухом.

Значения $\delta^{18}\text{O}$ в осадках на австралийской сети станций МАГАТЭ (7 станций, 6 из которых находится на побережье и одна в центре континента) в течение года варьируют в диапазоне от $-15,41$ до $+11,46\text{‰}$. Экстремально высокие положительные значения $\delta^{18}\text{O}$ в дожде объясняются тем, что в течение нескольких месяцев на процесс выпадения осадков сильно влияет испарение падающих капель [13].

Среднегодовые осадки для территории исследований [1, 2, 6] имеют значения $\delta^{18}\text{O}$ от -12 до -13‰ (рис. 4, а), такие же значения отмечены нами для грунтовых вод в районе Сатинского полигона. В зимний сезон 2012 г. в Сатине также отобраны образцы речной воды из рек Протва, Исьма и ручьев Егорова и Восточно-Сатинского оврагов. Значения $\delta^{18}\text{O}$ варьируют в диапазоне от $-12,2$ до $-12,9\text{‰}$, что отражает грунтовое питание глубокой межени.

Изотопный состав речной воды. Изотопный состав ($\delta^{18}\text{O}$ и δD) воды рек показывает изменение во времени соотношения поступающих в реки осадков и подземных вод. Сезонные вариации изотопного состава более выражены в реках, основным источником питания которых служат осадки, и менее выражены в реках, питающихся преимущественно за счет подземных вод. По мере увеличения площади бассейна реки на изотопный состав воды реки все больше влияют вариации изотопного состава осадков, поверхностного стока, примесь более древних подземных вод, испарение [11].

Для залесенных ландшафтов в умеренном климате обычно наблюдается следующее соотношение поверхностного стока и поступления подземных вод в питание реки: 15 и 85% соответственно, т.е. после выпадения дождя только 15% осадков сразу поступает в реки, а 85% просачивается в водоносные горизонты и попадает в реку впоследствии [12]. Для Сатинского полигона это соотношение смещено в сторону увеличения доли прямого поступления дождей в реку (дождевые паводки) в результате сильного поверхностного стока, обусловленного высокой расчлененностью рельефа овражно-балочной сетью, большими значениями уклона бортов речных долин и низкими инфильтрационными свойствами почв из-за их тяжелого механического состава. Среднеголетний максимальный расход во время дождевых паводков в р. Протва составляет 69,2 м³/с при среднеголетнем среднегодовом ее расходе, равном 21 м³/с, и среднеголетнем минимальном расходе летней и зимней межени — 6,43 м³/с [5].

Изотопный состав малых рек быстрее отражает изотопный состав атмосферных осадков по сравнению с крупными реками, поскольку на малые реки большее влияние оказывает поверхностный сток. Так, для небольшой р. Лайнбах в баварских Альпах (Германия) отмечена быстрая реакция изотопного состава воды реки на изотопно легкий дождь — значения $\delta^{18}\text{O}$ в реке уменьшились на 0,8‰, длительность импульса составляла 10—12 ч. Подобная продолжительность изотопного импульса атмосферных осадков отмечена и для р. Ивами в Японии. В течение 18 ч выпало 85 мм осадков в виде дождя; через 12 ч после начала дождя было отмечено увеличение скорости потока воды (расхода) от $100 \cdot 10^3$ до $300 \cdot 10^3$ м³/ч и од-

новременное облегчение изотопного состава воды реки от -9,5 до -10,5‰ $\delta^{18}\text{O}$. Этот импульс длился в течение 10 ч, после чего и расход реки, и изотопный состав воды вернулись к прежним показателям [12].

Выводы:

— грунтовые воды в пределах Сатинского учебно-научного полигона характеризуются значениями $\delta^{18}\text{O}$ от -12 до -13‰. Изотопный состав грунтовых вод равен среднегодовому изотопному составу осадков для территории центра европейской части России. В летнюю и зимнюю межень изотопный состав р. Протва отвечает таковому грунтовых вод;

— изотопный состав р. Протва отражает смешанное питание: в изотопно-кислородном составе основу составляет участие подземных вод со значениями -12...-13‰, в летний сезон вклад метеорных вод утяжеляет состав речной воды на 2‰, а процессы испарения воды утяжеляют состав еще на 0,5—1‰;

— выпадение изотопно тяжелых дождей в летний сезон в Сатине связано с разгрузкой воздушных масс, приходящих от Черного и Каспийского морей, и сильным подоблачным испарением в жаркие засушливые периоды;

— влияние изотопно тяжелых осадков на изотопный состав р. Протва, обусловленное сильным поверхностным стоком, выражено в изменении $\delta^{18}\text{O}$ в пределах 0,6‰, причем полностью релаксирует в течение нескольких часов после выпадения дождя.

Авторы выражают признательность сотрудникам лаборатории атмосферных ресурсов Национальной администрации по атмосфере и океану США (ARL NOAA) за предоставленную возможность выполнить расчеты с помощью модели переноса HYSPLIT (<http://www.arl.noaa.gov/ready.php>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брезгунов В.С., Есиков А.Д., Ферронский В.И., Сальнова Л.В. Пространственно-временные вариации изотопного состава кислорода атмосферных осадков и речных вод на территории северной части Евразии и их связь с изменением температуры // Водные ресурсы. 1998. Т. 25, № 1. С. 99—104.
2. Брезгунов В.С., Есиков А.Д., Якимов Т.В. и др. Распределение среднегодовых концентраций кислорода-18 в осадках на европейской территории СССР // Мат-лы метеорол. исследований. 1987. № 12. С. 54—58.
3. Васильчук Ю.К., Котляков В.М. Основы изотопной геоэкологии и гляциологии: Учебник. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2000. 616 с.
4. Васильчук Ю.К., Чижова Ю.Н., Панеш В. Тренд изотопного состава отдельного зимнего снегопада на северо-востоке Европы // Криосфера Земли. 2005. Т. 9, № 3. С. 81—87.
5. Общегоеографическая практика в Подмосковье / Под ред. Г.И. Рычагова. М., 2007. 360 с.
6. Ферронский В.И., Поляков В.А. Изотопия гидросферы Земли. М.: Научный мир, 2009. 632 с.
7. Чижова Ю.Н., Добролюбов С.А., Буданцева Н.А. и др. Оценка влияния малых рек на приповерхностные воды Черного моря по изотопным данным // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2011. № 6. С. 54—59.
8. Craig H. Isotope variation in meteoric waters // Science. 1961. Vol. 133. P. 1702—1703.
9. Craig H., Gordon L.I. Deuterium and oxygen-18 variation in the ocean and the marine atmosphere // Stable Isotopes in Oceanographic Studies and Paleotemperatures / Ed. by E. Tongiorgi. Spoleto, Cons. Naz. delle Ric. Pisa, 1965. P. 9—130.
10. Draxler R.R., Rolph G.D. HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian integrated trajectory) model access via NOAA ARL READY Website. NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD. 2011. URL: <http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php> (дата обращения: 23.11.2011).
11. Environmental isotopes in the hydrological cycle. Principles and applications / Ed. by W.G. Mook. 2001. Vol. III. 117 p.
12. Hydrogen and oxygen isotopes in hydrology. The Textbook for the eleventh IHP training course in 2001 / Ed. by N. Yoshida. 2001. 291 p.
13. Liu J., Fu G., Song X. et al. Stable isotopic compositions in Australian precipitation // J. Geophys. Res. 2010. Vol. 115. D23307, doi:10.1029/2010JD014403.
14. Rank D., Papesch W. Isotopic composition of precipitation in Austria in relation to air circulation patterns and climate // Isotopic composition of precipitation in the Mediterranean Basin in relation to air circulation patterns and climate. Vienna: IAEA, 2005. P. 19—35.

15. *Risi C., Bony S., Vimeux F.* et al. Evolution of the water stable isotopic composition of the rain sampled along Sahelian squall lines // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2010. Vol. 136 (S1). P. 227—242.

16. *Rolph G.D.* Real-time environmental applications and display system (READY) Website NOAA Air resources Labora-

tory, Silver Spring, MD. 2011. URL: <http://ready.arl.noaa.gov> (дата обращения: 23.11.2011).

17. *Yurtsever Y., Gat J.R.* Atmospheric waters // *Stable isotope Hydrology. Deuterium and oxygen-18 in the water cycle* IAEA. Ch 6. 1981. P. 103—142.

Поступила в редакцию
30.12.2011

**Ju.N. Chizhova, N.A. Budantseva, L.E. Efimova,
A.N. Lukianova, G.V. Surkova, Yu.K. Vasil'chuk**

OXYGEN ISOTOPE COMPOSITION OF PRECIPITATION AND WATER IN THE MIDDLE PROTVA RIVER SYSTEM

Oxygen isotope composition of river flow, precipitation and ground water in the middle reaches of the Protva River within the Satino training station of the MSU Faculty of Geography was studied using the stable isotope analysis. Oxygen isotope composition was analyzed at the Isotope Laboratory of the MSU Faculty of Geography with the Delta-V mass-spectrometer with standard gas-bench option. A short-time influence of precipitation on the isotope composition of river water was revealed, the origin of summer precipitation was identified and the causes of rains with anomalous heavy isotope composition were discussed.

Key words: oxygen isotope composition of natural water, anomalous isotope composition of precipitation.