

СПОСОБ ОПТИМИЗАЦИИ СЕТИ МОНИТОРИНГА ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА СНЕЖНОГО ПОКРОВА НА ПРИМЕРЕ О. САХАЛИН

В.А. Ветров, В.В. Кузовкин, Д.А. Манзон

Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН
Россия, 107258, г. Москва, ул. Глебовская, д. 20Б; vetrov.igce@mail.ru

Резюме. Работа посвящена решению задачи оптимизации (сокращения) числа изначально действующей сети из 13 пунктов наблюдений (ПН) за химически составом снежного покрова (ХССП) на территории о. Сахалин. Критерий оптимизации: наименьшее (в приемлемых пределах) отличие результатов мониторинга, рассчитанных по наблюдениям на оптимальной (сокращенной) сети, от исходных результатов, полученных на сети из 13 ПН. В качестве результатов мониторинга выбраны опорные показатели - средние (по площади региона) значения кислотности pH и интенсивности выпадения серы P_S (кг/км² мес.). Определение оптимальных параметров сети (числа и локализации ПН) выполнялось путем расчета значений опорных показателей и последующей оценки их отклонений от исходных значений для всех вариантов сокращения сети. В итоге из результатов расчетов был выбран оптимальный вариант локализации сети из 5 ПН. Для оптимального варианта средние значения pH практически не отличаются от соответствующих исходных значений, а разность между значениями P_S для оптимального и исходного вариантов сети (до 8 % выше исходного значения) находится в приемлемых пределах.

Ключевые слова. Оптимизация, сеть, мониторинг, химический состав, снежный покров, пункт наблюдений, опорный показатель, кислотность, интенсивность выпадения серы, остров Сахалин.

A WAY TO OPTIMIZE SNOW COVER CHEMICAL COMPOSITION MONITORING NETWORK: THE SAKHALIN CASE STUDY

V.A. Vetrov, V.V. Kouzovkin, D.A. Manson

Institute of Global Climate and Ecology of Roshydromet and RAS,
20B, Glebovskaya str., 107258 Moscow, Russia; vetrov.igce@mail.ru

Summary. The study addresses the task of optimizing (reducing) the number of observation points (OPs) in the original snow cover chemical composition (SCCC) monitoring network on the Sakhalin Island. The optimization criterion: the lowest acceptable difference between the monitoring results obtained from the optimized (reduced) network and the initial results obtained from the original net-

work consisting of 13 OPs. The selected monitoring results include the reference indicators: area-averaged snow water acidity (pH) and sulfur deposition flow rate P_S (kg/km²·month). The optimal network parameters (OP number and locations) were determined by calculating reference indicator values and subsequent assessment of their deviations from the initial values for all network reduction options. The optimal network localization option selected from the results includes 5 OPs. The optimal option practically does not differ from the original network in the average pH values while its difference from the original network in the P_S values (up to 8 % higher than the initial values) is within the acceptable limits.

Keywords. Optimization, network, monitoring, chemical composition, snow cover, observation points, reference value, acidity, sulfur deposition rate, Sakhalin Island.

Введение

Снежный покров, как естественный планшет-накопитель атмосферных (снежных осадков), даёт возможность измерять величину сухих и влажных выпадений загрязняющих веществ (ЗВ) и кислотности (pH) атмосферных осадков в холодный сезон. Эти свойства снежного покрова послужили основой для организации в середине 1980-х г.г. мониторинга химического состава снежного покрова (ХССП) на территории СССР (Василенко и др., 1985).

В 2015 году сеть наблюдений по программе мониторинга ХССП на территории России включала 545 пунктов наблюдений (ПН), в каждом из которых производился отбор проб снега в конце зимнего периода. Действующая сеть ПН на территории России была сформирована в середине 1980-х г.г. при проектировании всей системы мониторинга ХССП на территории бывшего СССР; до настоящего времени она имеет наибольшее число ПН по сравнению с сетями других систем мониторинга загрязнения окружающей среды Росгидромета. Наблюдения за ХССП в каждом регионе осуществляет одно из 23 региональных Управлений по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (УГМС). В пробах снежного покрова, отбираемых в конце зимнего периода, определяются кислотность (водородный показатель pH) и концентрации основных ионов - сульфат-иона (SO_4^{2-}), нитрат-иона (NO_3^-), хлорид-иона (Cl^-), гидрокарбонат-иона (HCO_3^-), ионов аммония (NH_4^+), натрия (Na^+), калия (K^+), кальция (Ca^{2+}) и магния (Mg^{2+}).

Основные задачи мониторинга ХССП: 1) исследование распределения кислотности и содержания ЗВ в снежных осадках по площади каждого из регионов РФ; 2) оценка распределения средних значений pH и потоков ЗВ на территории России за зимний период. Методология мониторинга ХССП в современный период изложена в Обзоре (Ветров и др., 2015а) и в статье (Ветров и др., 2015б).

К 2014 году сложилась ситуация, когда в связи с оптимизацией систем мониторинга окружающей среды Росгидромета система мониторинга ХССП впервые за всю историю наблюдений потребовала обоснования параметров действующей сети, т.е. количества ПН и их распределения (локализации) в границах регионов, контролируемых каждым УГМС. Необходимость оптимизации сети послужила стимулом к разработке общих подходов к форми-

рованию сети наблюдений за химическим составом атмосферных осадков, параметры которой отвечали бы задачам мониторинга ХССП. В целом, оптимизация сети наблюдений в 2014 году сводилась, по существу, к сокращению числа ПН практически в каждом регионе.

Исходя из задач оптимизации, цель настоящей работы состояла в разработке методологии сокращения числа ПН существующей сети мониторинга ХССП в пределах некоторой контролируемой территории (региона) **по критерию наибольшего соответствия результатов мониторинга, рассчитанных по наблюдениям на оптимальной (сокращенной) сети, результатам, полученным на исходной сети с максимальным количеством ПН.**

Методология

Подход к оптимизации сети наблюдений

По состоянию на 2015 год, площадь территории, контролируемой каждым из 23 УГМС, варьирует от 85 – 140 тыс. км² (Мурманское, Башкирское, Сахалинское УГМС) до 2.5 – 3 млн. км² (Среднесибирское, Якутское УГМС), т.е. с разбросом более чем в 30 раз. При средней (для всей территории страны) плотности сети около 30 000 км² на 1 ПН, разброс этого параметра для контролируемых каждым УГМС территорий составляет от 5000 – 6500 км²/ПН (Сахалинское, Мурманское УГМС) до 85 000 – 102 000 км²/ПН (Северо-Кавказское, Якутское, Чукотское УГМС) (Ветров и др., 2015а), т.е. до 20 раз.

Разработка методологии оптимизации проводилась на примере сети наблюдений Сахалинского УГМС, которое контролирует небольшой регион - о. Сахалин и Курильские о-ва. В 1995 – 2013 годах сеть мониторинга ХССП включала 13 исходных («реперных») ПН на территории о. Сахалин (площадь 76 000 км²) при плотности сети 5840 км²/ПН (рис. 1). В качестве результатов мониторинга, которые использовались для расчетов по методологии оптимизации сети, были выбраны наиболее востребованные показатели загрязнения снежных осадков за каждый зимний период: средние (по площади сети мониторинга - о. Сахалин) значения кислотности pH и интенсивности выпадения серы P_S (кг/км² мес.). Эти результаты мониторинга ХССП играют роль *опорных показателей*, по которым оценивается эффективность оптимизации.

Для выбора оптимальных вариантов параметров сети рассчитывались исходные средние значения опорных показателей, полученные по данным наблюдений на сети 13 «реперных» ПН (рис. 1) в i -м году (т.е. в конце зимнего периода $[i-1]$ -го - i -го г.г.) – $pH_{i}(13)$ и $P_{S,i}(13)$. В этих расчетах использовались площади участков территории S_j , которые освещаются каждым j -м ПН $_j$. При картировании участок территории, контролируемой отдельным ПН $_j$, изображается в виде так называемого «полигона Вороного» (Капралов и др., 2005). Полигоны Вороного (мозаика Вороного, разбиение Дирихле) представляют собой фрагменты территории, каждый из которых содержит множество точек, более близких к принадлежащему этому фрагменту ПН, чем к любому другому ПН из их множества. На рис. 1 показаны полигоны Вороного для 13 опорных ПН, рассчитанные с помощью ГИС Mapinfo.

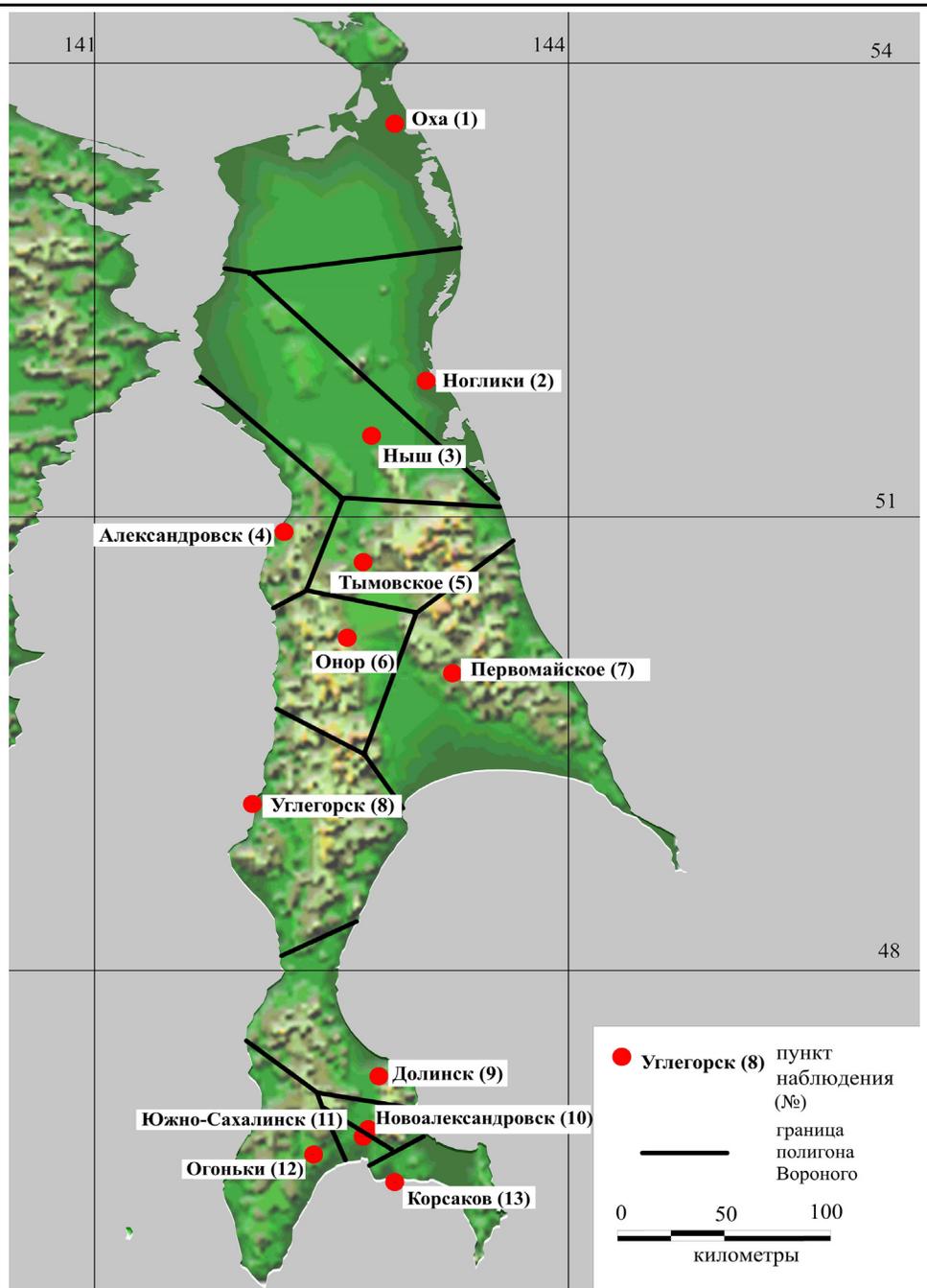


Рисунок 1. Расположение 13 «реперных» пунктов наблюдения на о. Сахалин и соответствующие каждому из них полигоны Вороного

Задача оптимизации – уменьшить количество ПН на территории о. Сахалин из числа 13 «реперных» ПН таким способом, при котором значения опорных показателей, рассчитанные по наблюдениям на сокращенной (гипотетической) сети ПН, будут отличаться от их исходных значений **в пределах приемлемого (минимально возможного) отклонения от исходных значений $pH_i(13)$ и $Ps_i(13)$.**

Расчёт исходных значений показателей

В общем виде расчет средних значений опорных показателей pH_i и Ps_i в i -м году для произвольной территории, контролируемой сетью из n ПН _{j} , определяется по формулам (1) и (2) (Ветров и др., 2015б):

$$pH_i = -lg \left(\frac{\sum_{i=1}^n S_i \cdot 10^{-pH_{i,i}}}{\sum_{j=1}^n S_j} \right), \quad (1)$$

где: $10^{-pH_{i,i}}$ – концентрация ионов водорода по значению pH в снеге на ПН _{j} , dm^{-1} ; S_j – площадь полигона Вороного, контролируемая ПН _{j} , km^2 .

$$P_{Si} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{Si,j} \cdot S_j}{\sum_{j=1}^n S_j}, \quad (2)$$

где: $P_{Si,j}$ – интенсивность выпадений серы на ПН _{j} в i -м году, kg/km^2 мес., рассчитываемая по формуле:

$$P_{Si,j} = \frac{0.33 \cdot C_{i,j} \cdot h_{i,j}}{\Delta t_i}, \quad (3)$$

где по наблюдениям в i -м году: $C_{i,j}$ – концентрация сульфат-иона в пробе снега на ПН _{j} , mg/l ; $h_{i,j}$ – влагозапас на площадке ПН _{j} , mm ; Δt_i – время залегания снежного покрова, мес.; 0.33 – доля содержания серы в сульфат-ионе.

В табл. 1 представлены исходные значения опорных показателей $pH_i(13)$ и $Ps_i(13)$ (для $n = 13$), рассчитанные по формулам (1 – 3) по данным наблюдений в период 1995 – 2013 г.г.; в этот период только в указанные в табл. 1 годы (10 лет) наблюдения велись на 13 «реперных» ПН, показанных на рис. 1. В последней колонке табл. 1 приведены средние значения $pH(13)$ и $Ps(13)$ за этот период наблюдений.

Таблица 1. Исходные значения опорных показателей $pH_i(13)$ и $Ps_i(13)$, kg/km^2 мес по данным наблюдений в период 1995 – 2013 г.г. на 13 «реперных» ПН (рис. 1)

Год	1995	1996	1997	2000	2005	2007	2008	2011	2012	2013	Среднее
$pH_i(13)$	6.0	5.7	5.6	4.9	6.1	5.8	5.4	5.9	6.1	5.7	5.7
$Ps_i(13)$	27	63	92	70	46	65	38	91	76	61	63

Анализ погрешностей определения опорных показателей $pH_i(13)$ и $Ps_i(13)$ позволяет оценить стандартную ошибку определения их значений за каждый i -й год в пределах $\pm 5\%$.

Алгоритм расчетов для определения оптимальных параметров сети ПН

Как было сказано выше, задача оптимизации – сократить количество действующих (исходных, «реперных») ПН на контролируемой мониторингом ХССП территории о. Сахалин до уровня, при котором значения опорных показателей pH_i и Ps_i (выбранных для оценки эффективности оптимизации), рассчитанные для какого-либо подходящего варианта сокращенной сети ПН, будут в наименьшей степени отличаться от их исходных значений $pH_i(13)$ и $Ps_i(13)$ (табл. 1) – т.е. в пределах приемлемого (минимально возможного) отклонения от исходных значений.

Решение этой задачи проводилось в следующей последовательности действий.

Рассмотрение (перебор) вариантов сети ПН

При выборе оптимальных параметров сети мониторинга ХССП, т.е. числа k ПН и их конкретного расположения на территории региона, было принято условие, что k ПН выбираются из числа 13 «реперных» ПН, показанных на рис. 1.

Число k при расчетах оптимальных параметров сети в принципе могло варьировать в пределах $k \in [1; 12]$. Однако по очевидным соображениям, с учетом реально наблюдаемых пространственных вариаций $pH_{i,j}$ и $Ps_{i,j}$ по территории региона (например, в зависимости от удаления ПН_j от местных источников загрязнения атмосферы), представляется практически невозможным получить средние показатели pH_i и Ps_i на сети, состоящей из 1 или 2 ПН, которые отличались бы от исходных значений $pH_i(13)$ и $Ps_i(13)$ в пределах приемлемого отклонения. Поэтому рассматривались сценарии выбора сети ПН для $k \in [3; 12]$, всего 10 сценариев « k ».

При сценарии « k » число возможных вариантов сети из k ПН из 13 «реперных» ПН равно числу сочетаний $N_{13}^k = 13! / (13-k)!k!$. В табл. 2 приведены значения числа N_{13}^k вариантов сети из k ПН для всех рассматриваемых в расчетах 10 сценариев. В последней колонке табл. 2 приведено общее количество рассмотренных вариантов, для которых были проведены соответствующие расчеты.

Таблица 2. Число N_{13}^k вариантов выбора сети из k ПН из 13 «реперных» ПН

k	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Всего
N_{13}^k	286	715	1287	1716	1716	1287	715	286	78	13	8099

Расчет значений опорного показателя для вариантов сети ПН по сценарию « k »

Для простоты дальнейших рассуждений обозначим опорные показатели pH и Ps одним условным символом P . Для сценария « k » нам необходимо рассчитать значения этого опорного показателя для всех N_{13}^k

вариантов сети из k ПН, выбранных из 13 «реперных» ПН (табл. 2). Для каждого варианта m из числа N_{13}^k вариантов сети из k ПН среднее (по площади региона) значение $P_i(k, m)$ в i -м году рассчитывается по формуле, аналогичной (2):

$$P_i(k, m) = \frac{\sum_{j=1}^k P_{i,j}(k, m) \cdot S_j(k, m)}{\sum_{j=1}^k S_j(k, m)}, \quad (4)$$

где: $P_{j,i}(k, m)$ – значение показателя P , полученное по данным наблюдений в i -м году на ПН $_j$ в конфигурации m сети из k ПН (сценарий « k », вариант « k, m »); $j = [1, k]$, $m = [1, N_{13}^k]$; $S_j(k, m)$ – площадь, контролируемая ПН $_j$ (полигон Вороного), рассчитанная для варианта « k, m », км².

Расчет площадей полигонов Вороного $S_j(k, m)$ для варианта « k, m »

Площади S_j полигонов Вороного на рис. 1, необходимые для расчета исходных значений опорных показателей $pH_i(13)$ и $P_{si}(13)$ по формулам (1 – 3), вычислялись обычным способом с помощью программы MapInfo (Ветров и др., 2015а, 2015б). Расчеты $S_j(k, m)$ в формуле (4) этим способом потребовали бы огромного объема ненужных вычислений (в основном, из-за трудоемких расчетов границ полигонов Вороного по программе MapInfo) при том, что сами по себе границы полигонов не играют никакой роли при определении $S_j(k, m)$ на этапе расчета опорного показателя $P_i(k, m)$ по формуле (4).

В наших расчетах площади полигонов Вороного $S_j(k, m)$ для всех вариантов « k, m » вычислялись более простым методом, не требующим расчетов границ полигонов для каждого варианта. Для расчетов по этому упрощенному методу территория о. Сахалин помещалась в границах трапеции, со сторонами по широте $45^{\circ} 51'$ и $54^{\circ} 21'$ С.Ш., по долготе $141^{\circ} 37'$ и $144^{\circ} 45'$ В.Д. В пределах границ трапеции строилась регулярная сетка 200x200 точек с расстоянием между точками (узлами сетки) $1'37''$ по широте и $56''$ по долготе (рис. 2).

По методу «регулярной сетки» с помощью программы MapInfo для варианта « k, m » строились полигоны Вороного с центром в каждом из k ПН $_j(k, m)$. В пределы площадей $S_j(k, m)$ входили 15 016 точек, находящихся в границах территории о. Сахалин из общего числа 40 000 точек в трапеции. Принадлежность каждой из этих 15 016 точек к конкретному ПН $_j(k, m)$ определяется по тому же правилу, что и для обычного метода: в площадь $S_j(k, m)$ включаются точки, для которых расстояние до ПН $_j(k, m)$ меньше, чем для любого другого из числа k ПН $_j$ для варианта « k, m ». Таким образом, полигон Вороного для ПН $_j(k, m)$ образуется из выбранных по этому правилу точек регулярной сетки, его площадь $S_j(k, m)$

вычисляется как сумма площадей элементарных ячеек с центром в узле (точке) сетки. На рис. 2 показан пример построения полигонов Вороного методом «регулярной сетки» для некоторого варианта сети мониторинга из 5 ПН.

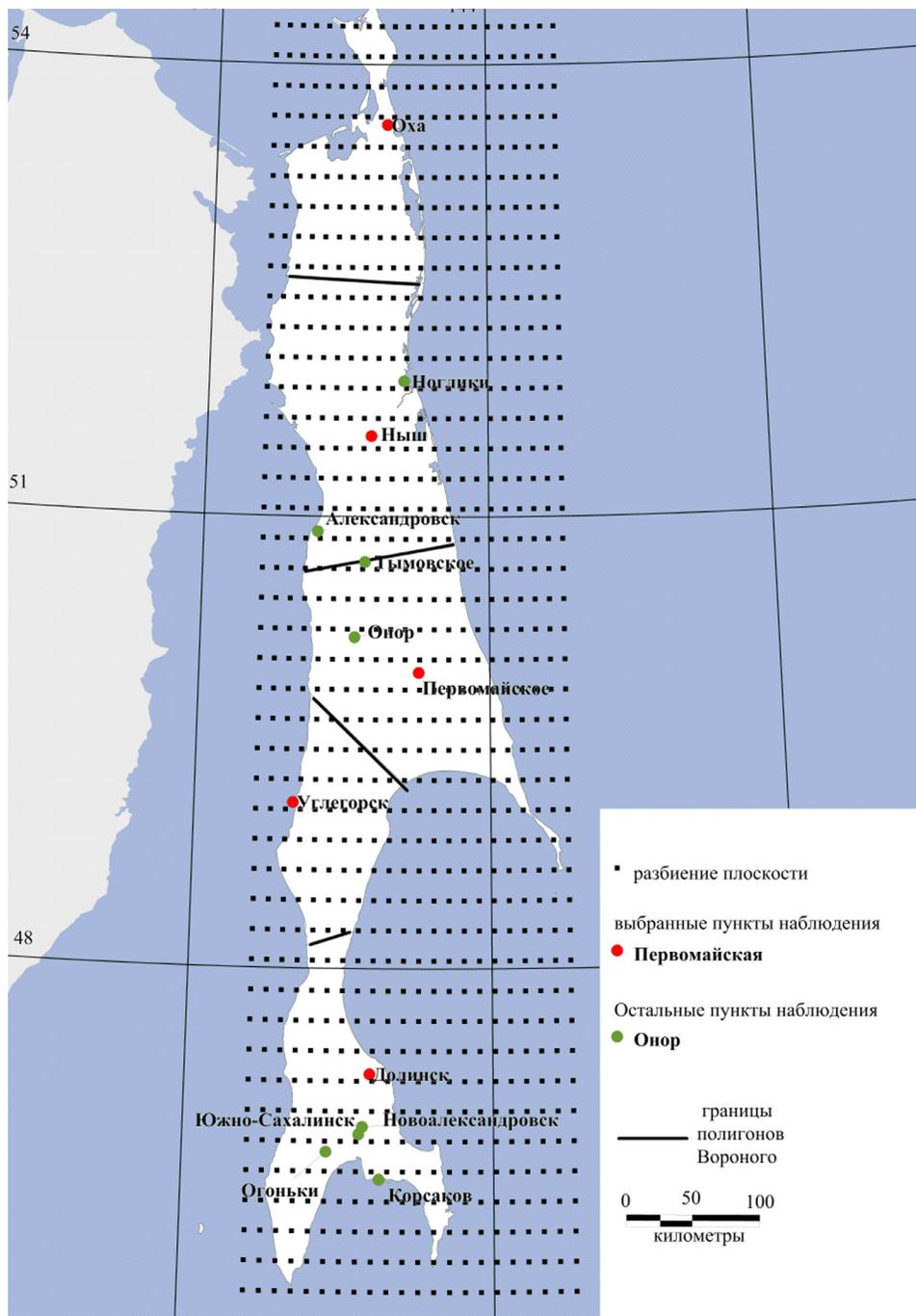


Рисунок 2. Расположение полигонов Вороного для некоторого варианта «5, *m*» сети ПН на о. Сахалин

В табл. 3 приведены результаты расчета площадей полигонов Вороного прежним методом и методом «регулярной сетки». Сравнение показывает практическое совпадение площадей; в большинстве случаев расхождение площадей не превышает 3 %, только в одном случае оно достигает 7 % (точка 9, вариант «5, m» сети ПН). Таким образом, расчеты площадей полигонов Вороного, выполненные более эффективным методом «регулярной сетки», вполне адекватны расчетам с помощью ранее использованного метода на основе программы MapInfo с расчетом границ полигонов (Ветров и др., 2015а, 2015б).

Таблица 3. Сравнение площадей полигонов Вороного S_j , рассчитанных по прежнему методу (Ветров и др., 2015а, 2015б) (1) и по более простому методу «регулярной сетки» (2), км²

№ ПН	Исходная сеть «реперных» ПН (рис. 1)		Вариант «5, m» сети ПН (рис. 2)	
	(1)	(2)	(1)	(2)
1	9445	9489	11190	11195
2	9496	9480		
3	7730	7760	20220	20208
4	2042	2100		
5	6176	6289		
6	4847	4912		
7	12079	11989	19610	19606
8	9289	9331	9498	9504
9	5520	5437	15270	14159
10	1294	1100		
11	635	620		
12	4628	4700		
13	3412	3389		

Оценка отклонений опорных показателей $P(k, m)$ от исходных значений

Искомое отклонение опорных показателей, полученных по наблюдениям на сети из k ПН, от их исходных значений, полученных на сети из 13 «реперных» ПН (рис. 1) оценивалось путем определения генерального коэффициента вариации δ_k – среднего из коэффициентов вариации $\delta_{k,m}$, рассчитанных по всем вариантам (k, m) сценария k .

Вычисление генерального коэффициента вариации δ_k выполнялось в два этапа. На первом этапе определялись коэффициенты вариации $\delta_{k,m}$ для каждого варианта « k, m » за весь период наблюдений (выборка из 10 значений, табл. 1) через относительное отклонение (вариацию) величины $P_i(k, m)$ от соответствующего исходного значения $P_i(13)$:

$$\delta_{k, m} = \sqrt{\frac{1}{10} \cdot \sum_{i=1}^{10} \left(\frac{P_i(k, m) - P_i(13)}{P_i(k, m)} \right)^2} \quad (5)$$

Далее вычислялся генеральный коэффициент вариации δ_k для всех вариантов « k, m » сценария « k » за весь период наблюдений:

$$\delta_k = \sqrt{\frac{1}{N_{13}^k} \cdot \sum_{m=1}^{N_{13}^k} \delta_{k,m}^2} \quad (6)$$

Величина δ_k играет роль общего индекса отклонения опорных показателей (результатов мониторинга) ХССП, полученных на всех вариантах сокращенной сети из k ПН (сценарий « k »), от их значений, полученных на исходной сети из 13 «реперных» ПН. Дополнительным показателем для сравнения служит среднее значение опорного показателя $P(k)$ за весь период наблюдений (табл. 1):

$$\bar{P} = \frac{1}{10} \cdot \sum P_i(k) \quad (7)$$

Таким образом, для определения всех значений δ_k и $P(k)$ для рассматриваемых опорных показателей pH и Ps в ходе работы были выполнены $8099 \times 2 = 16\,198$ серий расчетов (табл. 2) по формулам (4 – 7).

На рис. 3 показаны графики индекса δ_k для опорных показателей pH и Ps , рассчитанные для всех рассмотренных сценариев « k » - от 3 до 12.

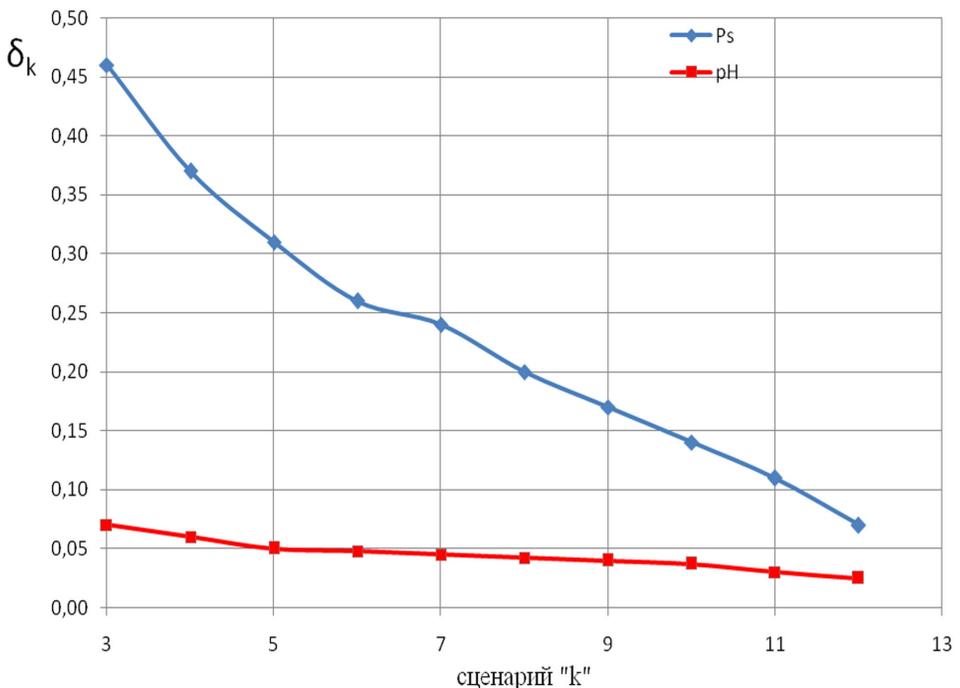


Рисунок 3. Зависимость индекса δ_k для pH и интенсивности выпадений серы Ps от количества ПН в сети мониторинга ХССП (сценария « k »)

Выбор оптимальных параметров сети мониторинга ХССП

Критерии выбора

Графики на рис. 3 демонстрируют ожидаемое снижение индекса δ_k с ростом числа k ПН. Анализ порядковой статистики результатов расчетов коэффициентов вариации $\delta_{k,m}$ (в сторону убывания) показал, что последние (минимальные) 10 значений $\delta_{k,m}$ практически одинаковые. Для выбора оптимального варианта сети (с наименьшим отклонением опорного показателя от исходного значения) из всей совокупности вариантов (k, m) в каждом сценарии « k » были выбраны 5 последних варианта порядковой статистики (с наименьшими значениями $\delta_{k,m}$); по этим вариантам были рассчитаны соответствующие «минимальные» индексы $\delta_k(5)$:

$$\delta_k(5) = \sqrt{\frac{1}{5} \cdot \sum_{m=1}^5 \delta_{k,m}^2} \quad (8)$$

Зависимость $\delta_k(5)$ для обоих опорных показателей от количества ПН в сети мониторинга ХССП (сценария « k ») показана на рис. 4.

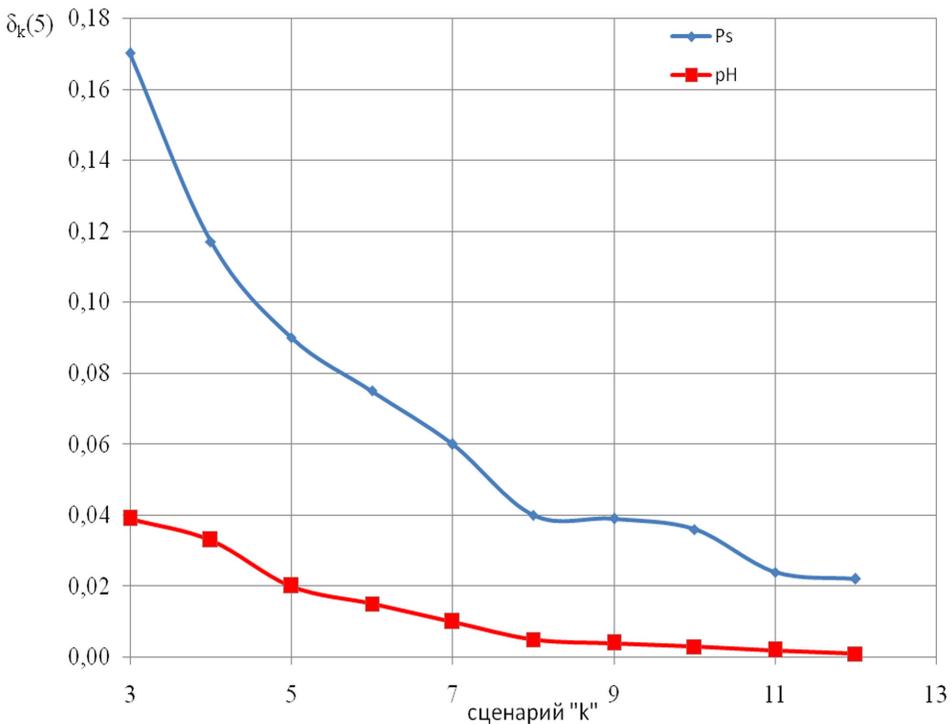


Рисунок 4. Зависимость «минимального» индекса $\delta_k(5)$ для pH и интенсивности выпадений серы Ps от количества ПН в сети мониторинга ХССП (сценария « k »)

Как видно из рис. 4, «минимальный» индекс $\delta_k(\mathbf{5})$ относительно генерального индекса δ_k (рис. 3) для $k > 4$ резко (в 3 – 4 раза) снижает погрешность опорных показателей по отношению к их исходным значениям. Для $k > 8$ индекс $\delta_k(\mathbf{5})$ для обоих показателей изменяется незначительно.

Выбор параметров оптимальной сети наблюдений

Анализ показанных на рис. 4 зависимостей приводит к выводу, что область оптимального числа ПН лежит в пределах от 5 до 8. В этом диапазоне коэффициент вариации $\delta_k(\mathbf{5})$, характеризующий величину вероятного отклонения значений опорных показателей от их исходных значений (см. формулу 8), изменяется в пределах, соответствующих диапазону $k = [5 - 8]$: (0.02 – 0.005) для pH и (0.09 – 0.04) для P_S . С учетом значительной межгодовой вариабельности исходных значений этих показателей – (4.9 – 6.1) для pH и (27 – 92) для P_S (см. табл. 1) – верхние пределы указанных выше диапазонов коэффициентов вариации следует признать вполне приемлемыми для числа ПН, равного 5.

Таким образом, выполненные расчеты по определению минимального количества ПН из исходных 13 ПН «реперной» сети приводят к числу 5 ПН для оптимальной сети ПН на территории о. Сахалин. Другим параметром оптимальной сети является распределение (локализация) 5 ПН, т.е. выбор конкретного варианта ($\mathbf{5}, \mathbf{m}$) из 5 отобранных вариантов с наименьшими значениями коэффициента вариации $\delta_5(\mathbf{5})$ (рис. 4).

Оптимальный вариант локализации сети из 5 ПН показан на рис. 2. Он был выбран из экспертной оценки по двум критериям; 1) равномерность распределения ПН по территории и 2) принадлежность ПН как к фоновым районам - Оха, Ныш, Первомайское, так и к районам с интенсивными атмосферными выбросами загрязняющих веществ - Углегорск, Долинск.

Для демонстрации соответствия параметров выбранной оптимальной сети основному критерию оптимизации на рис. 5, 6 приведены графики зависимости средних значений опорных показателей $pH(\mathbf{5})$ и $P_S(\mathbf{5})$, рассчитанные по данным наблюдений на оптимальной сети, в сравнении с исходными значениями. Из рис. 5, 6 видно, что средние значения опорных показателей $pH_i(\mathbf{5})$ и $P_{S_i}(\mathbf{5})$ за каждый отдельный год наблюдений в целом хорошо соответствует критерию приемлемого (минимально возможного) отклонения от исходных значений $pH_i(\mathbf{13})$ и $P_{S_i}(\mathbf{13})$. Хорошее соответствие результатов наблюдений на сокращенной (оптимальной) сети демонстрируется также практически полным совпадением средних значений pH для обоих вариантов сети мониторинга ХССП за весь период наблюдений: $pH(\mathbf{5}) = pH(\mathbf{13}) = 5.7$ (синяя линия на рис. 5). Оценка эффективности оптимизации по этому критерию для показателя P_S также положительная: расхождение между $P_S(\mathbf{5})$ и $P_S(\mathbf{13})$ (соответственно, синяя и красная линии на рис. 6) всего 5 кг/км²-мес. (около 8 % выше исходного значения).

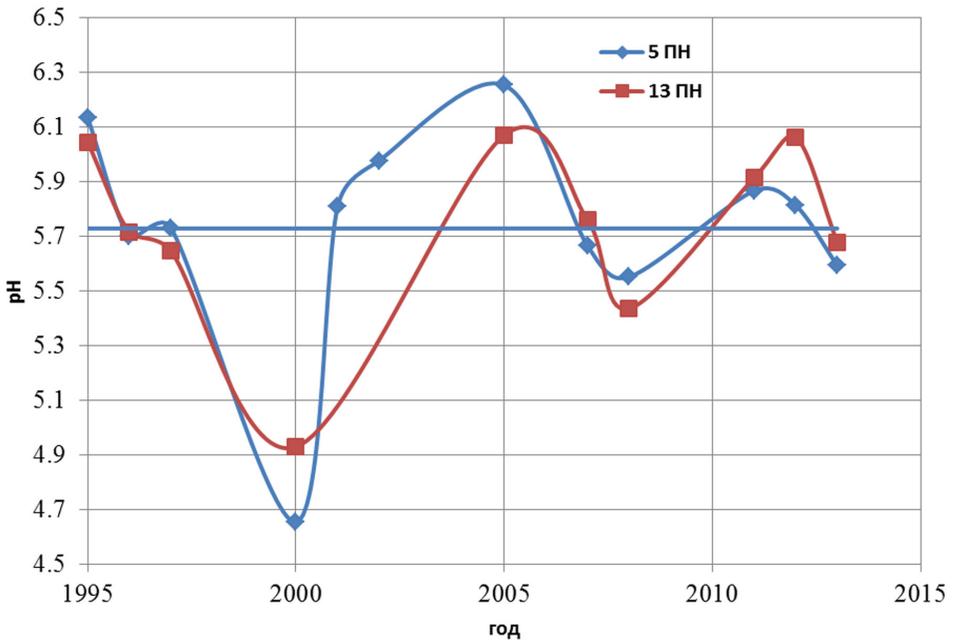


Рисунок 5. Среднее значение pH_t по данным наблюдений на исходной (13) и оптимальной (5) сетях мониторинга ХССП в период 1995 – 2013 гг.

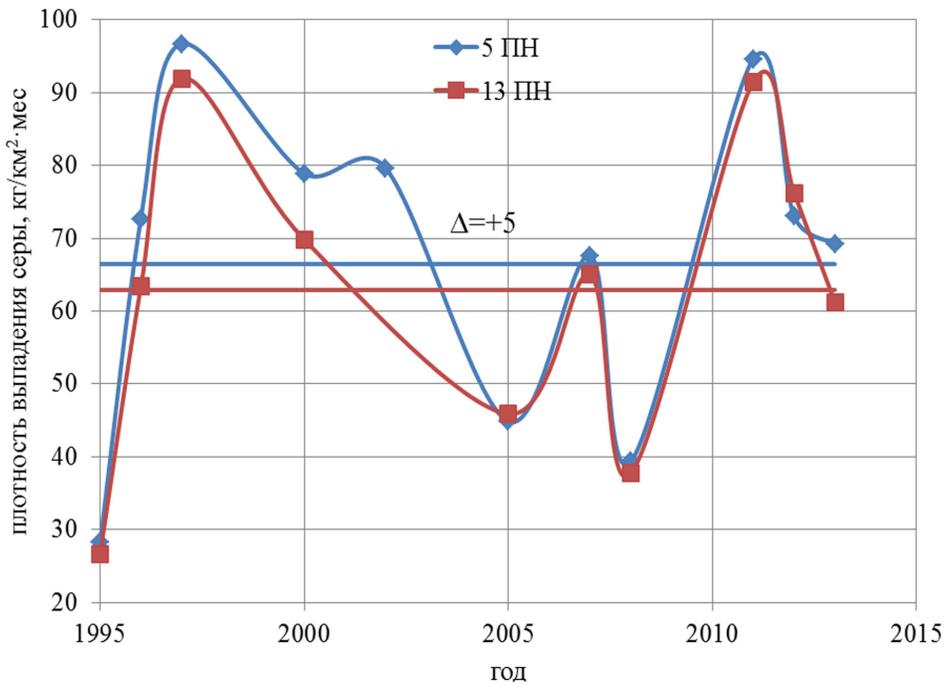


Рисунок 6. Среднее значение P_s по данным наблюдений на исходной (13) и оптимальной (5) сетях мониторинга ХССП в период 1995–2013 гг.

Выбор оптимального числа ПН по методу эквивалентно-независимых ПН

При решении задач оптимизации сетей метеорологических наблюдений для определения минимального количества станций, необходимых для полного освещения некоторой территории метеоданными, был предложен метод расчета эквивалентно-независимых станций (пунктов) наблюдений (Багров, 1969; Тер-Мкртчян, 1969). По определению, эквивалентно-независимыми считаются ПН, данные наблюдений на которых являются статистически независимыми друг от друга.

Этот метод был применен нами в качестве альтернативного метода оценки минимального количества ПН, необходимых для определения опорных показателей мониторинга ХССП на территории о. Сахалин с достаточной точностью, т.е. с приемлемым отклонением от результатов, полученных на «реперной» сети из 13 ПН (рис. 1). Таким образом, этим методом наша задача решается путем определения количества эквивалентно-независимых ПН в «реперной» сети ПН.

В настоящем сообщении мы опускаем весь алгоритм расчетов числа эквивалентно-независимых ПН, подробно изложенный в работах (Багров, 1969; Тер-Мкртчян, 1969). В результате расчетов с использованием всех данных, полученных на «реперной» сети из 13 ПН за 10 лет (табл. 1), были получены следующие значения этого числа: для pH – 5.84; для P_S - 4.31. Таким образом, минимальное количество ПН, оцениваемое по методу эквивалентно-независимых ПН для выбранных нами опорных показателей мониторинга ХССП, равно 5. Это число ПН удачно совпадает с оценкой минимального количества ПН по предлагаемому нами методу оптимизации сети для выбранных опорных показателей мониторинга ХССП.

Выводы

1. Необходимость оптимизации сети мониторинга загрязнения окружающей среды послужила стимулом к разработке общих подходов к формированию сети наблюдений за химическим составом атмосферных осадков.

2. Предложена методология сокращения числа ПН существующей сети мониторинга ХССП в пределах некоторой контролируемой территории (региона) **по критерию наибольшего соответствия результатов мониторинга, рассчитанных по наблюдениям на оптимальной (сокращенной) сети, результатам, полученным на исходной сети с максимальным количеством ПН.**

3. Разработка методологии оптимизации проводилась на примере сети наблюдений Сахалинского УГМС, которая контролирует территорию о. Сахалин. В качестве результатов мониторинга опорных показателей были выбраны средние (по площади региона) значения кислотности pH и интенсивности выпадения серы P_S (кг/км² мес.).

4. Основой методологии решения задачи оптимизации служил алгоритм расчетов для определения оптимальных параметров сети ПН, который

состоял в последовательности действий от перебора вариантов сети ПН до оценки отклонений опорных показателей от исходных значений.

5. С помощью разработанной методологии был выбран оптимальный вариант количества ПН сети мониторинга ХССП из всей совокупности вариантов сети – 5 ПН. Оптимальный вариант расположения (локализации) 5 ПН оптимальной сети был выбран по критериям равномерности распределения ПН по территории и принадлежности ПН как к фоновым районам, так и к районам с интенсивными атмосферными выбросами загрязняющих веществ.

6. В качестве альтернативного метода оценки минимального количества ПН, необходимых для определения опорных показателей мониторинга ХССП, был применен метод расчета эквивалентно-независимых станций (пунктов) наблюдений (Багров, 1969; Тер-Мкртчян, 1969). Минимальное количество ПН для опорных показателей мониторинга ХССП, оцениваемое по этому методу, равно 5, что совпадает с оценкой количества ПН по предлагаемой методологии оптимизации сети.

7. Предложенный способ (методология) оптимизации сети ПН мониторинга ХССП может быть применим к любым сетям мониторинга химического состава атмосферных осадков, для которых результатами мониторинга выступают средние (по площади контролируемой территории) значения наблюдаемых показателей химического состава.

Список литературы

Багров Н.А. 1969. Об эквивалентном числе независимых станций. – Тр. Гидрометцентра СССР, вып. 44, с. 3 – 11.

Василенко В.Н., Назаров И.М., Фридман Ш.Д. 1985. Мониторинг загрязнения снежного покрова – Л.: Гидрометеиздат, 180 с.

Ветров В.А., Кузовкин В.В., Манзон Д.А. 2015а. Загрязнение и закисление снежного покрова на территории Российской Федерации по данным сети наблюдений. – В кн.: Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2014 г. – М., Росгидромет, с. 60 – 67.

Ветров В.А., Кузовкин В.В., Манзон Д.А. 2015b. Кислотность атмосферных осадков и выпадение серы и азота на территории Российской Федерации по данным мониторинга химического состава снежного покрова. – Метеорология и гидрология, № 10, с. 44 – 53.

Капралов Е.Г., Кошкарев А.В., Тикунов В.С. и др. 2005. Геоинформатика. – Учебник для студентов вузов /Под ред. В.С.Тикунова. — М: Издательский центр «Академия», 480 с.

Тер-Мкртчян М.Г. 1969. К определению числа независимых станций, “эквивалентных” данной системе коррелированных станций. – Метеорология и гидрология, № 2, с. 24 – 36.

Статья поступила в редакцию 09.03.2016.

После переработки 03.06.2016.