

Усовершенствованные методы прогнозов атмосферной, почвенной, атмосферно-почвенной засушливости и засух

Исследования по данному вопросу велись в направлении выявления оптимальных предикторов для прогноза засушливости, засух на европейской части России и создания усовершенствованных экспериментальных методик к этим прогнозам для отдельных регионов России.

Уточним терминологию, употребляемую в данной статье. В работе Д.А.Педея [1] под термином «засушливость» понимаются положительные значения Si , а «засухой» считается явление, при котором значения параметра засушливости выше двух ($Si \geq 2.0$).

Выражение Si имеет вид:

$$Si = \frac{\Delta T}{\sigma_T} - \frac{\Delta R}{\sigma_R} - \frac{\Delta W}{\sigma_W}, \quad (1)$$

где ΔT , ΔR , ΔW -аномалии температуры воздуха, осадков и влагозапасов почвы; σ_T , σ_R , σ_W - их среднеквадратические отклонения.

На основании переданной нам отделом агрометеорологических прогнозов в 2003г. базы данных (БД) о влагозапасах в почве за апрель-июль 1997-2002 гг. появилась возможность определить три вида засушливости за этот период – атмосферную (S_a), почвенную (S_n) и атмосферно-почвенную (S_{an}) по формулам представленным ниже:

атмосферная
$$S_a = \frac{\Delta T}{\sigma_T} - \frac{\Delta R}{\sigma_R}, \quad (2)$$

почвенная
$$S_n = \frac{\Delta W}{\sigma_W}, \quad (3)$$

атмосферно-почвенная по формуле (1), где вместо Si должно быть S_{an} .

На первом этапе определялся вклад атмосферной и почвенной засушливостей в атмосферно-почвенную по станциям Армавир и Ростов-на-Дону. Было установлено [2], что наибольший вклад в атмосферно-почвенную засушливость дает атмосферная засушливость, а почвенная лишь ее корректирует. Коэффициент корреляции между атмосферной и почвенной засушливостью, например, для мая составляет 0.32.

Для оценки роли каждой компоненты атмосферно-почвенной засушливости было проведено сравнение их с урожайностью озимой пшеницы и всех зерновых культур для станций Армавир и Ростов-на-Дону. Эти данные приведены в табл.1.

Таблица 1

Оценки связи ρ аномалии урожайности озимой пшеницы и всех зерновых культур с атмосферной (S_a), почвенной на уровне 0-20 см (S_{n-20}) и атмосферно-почвенной (S_{an}) засушливостью по станциям Армавир и Ростов-на-Дону за апрель-июнь 1971-2000 гг.

Засушливость	Армавир				Ростов-на-Дону			
	Ср.	IY	Y	YI	Ср.	IY	Y	YI
урожай озимой пшеницы								
<i>Sa</i>	-0,21	0,00	-0,37	-0,27	-0,27	0,03	-0,53	-0,30
<i>S_{n-20}</i>	-0,09	-0,20	0,07	-0,13	0,02	-0,13	0,23	-0,03
<i>San</i>	-0,10	0,03	-0,10	-0,23	-0,18	0,10	-0,40	-0,23
урожай всех зерновых культур								
<i>Sa</i>	-0,21	-0,13	-0,37	-0,13	-0,30	-0,07	-0,43	-0,40
<i>S_{n-20}</i>	-0,13	-0,33	0,07	-0,13	0,12	-0,03	0,33	0,07
<i>San</i>	-0,01	0,17	-0,10	-0,10	-0,23	0,00	-0,37	-0,33

Важным вопросом является совпадение атмосферно-почвенной засухи ($San \geq 2.0$) с урожайностью различных зерновых культур. Учитывая, что Армавир и Ростов-на-Дону находятся в близких климатических условиях, мы объединили все годы с засухой- $Sa \geq 2.0$ (их оказалось 61 случай). При этом в 45 годах (74%) при засухе отмечался неурожай и только в 16 случаях (26%) – урожай. Таким образом, можно констатировать, что параметр $San \geq 2.0$ в основном правильно указывает на неурожай.

Была также исследована сопряженность (%) аномалии урожая озимой пшеницы ($\Delta Уоп$) с величинами атмосферной (Sa), почвенной (Sn) и атмосферно-почвенной (San) засухливости. Наибольший интерес представляет совпадение $S < -2.0$ (избыточное увлажнение) с урожаем и $S \geq 2.0$ (засуха) с неурожаем. Расчеты показали, что в Армавире сопряженность двух указанных выше градаций составила (Sa, S_{n-20}) по 17%, а с San – по 18%. В Ростове-на-Дону урожай при избыточном увлажнении и при засухе неурожай составили по 14%. Подобные ситуации наблюдались и при $San < -2.0$, урожай отмечался в 20% случаев, а при $San \geq 2.0$ неурожай – в 18%. Однако привлечение S_{n-20} отдельно считаем нецелесообразным, т.к. здесь виден большой разброс и наибольшая повторяемость грации (от -1.9 до 1.9).

Таким образом, исследования, проведенные по станциям Армавир и Ростов-на-Дону, показывают, что урожайность в основном сопряжена с атмосферной и атмосферно-почвенной засухливостью.

Анализ потенциальных предикторов для прогноза атмосферной и атмосферно-почвенной засухливости проводился с помощью регрессионного метода.

Из информативных предикторов отобраны наилучшие (с обеспеченностью более 95 %). Отбор производился методом пошаговой регрессии с ограничением числа предикторов - 3. Дополнительно к двум станциям (Ростов-на-Дону, Армавир) были привлечены еще 6 станций (Москва, Казань, Курск, Астрахань, Саратов, Оренбург) с данными о влагозапасах в слое почвы 0-20 см.

По данным продуктивной влаги для 8 пунктов были рассчитаны значения параметра почвенной засухливости (Sn) для апреля, мая, июня за 30 лет. Эти данные подверглись корреляционному анализу совместно с другими атмосферными параметрами. Корреляционные связи показывают очень сложную картину. Некоторые результаты не удастся объяснить какими-либо физическими механизмами. С другой стороны, были рассчитаны корреляционные матрицы для каждой из восьми станций, куда вошли Sn за апрель, май, июнь, а также среднемесячная температура воздуха и месячная сумма осадков за первую половину года (январь-июнь). Это позволило изучить связи почвенной засухливости с предшествующим состоянием погоды (T, R). Затем с помощью пошаговой регрессии для каждой станции в отдельности построены модели на множестве вышеуказанных предикторов для зависимой переменной Sn в июне. Таким образом, потенциальными предикторами были 14 независимых переменных. При обеспечении 95% уровня значимости в модели отбирались от 5 до 11 предикторов для различных пунктов с описанием дисперсии от 50 до 80%.

Рассмотрим некоторые особенности этих моделей. Сначала оценим инерционность Sn . Как правило, во все модели в качестве предикторов вошли Sn за апрель, май, при этом для Курска, Москвы и Армавира только май, а для Казани – за апрель. Таким образом, для более южных районов характерна инерционность с предшествующими двумя месяцами (май, апрель), за исключением Армавира. В центральном районе инерция ослабевает.

Температура воздуха за ближайшие три месяца (апрель, май, июнь), как правило, входит в модель. Исключения составляют станции, для которых в модель вошла температура только за июнь (Армавир, Курск) и за апрель (Оренбург). Температура воздуха за зимние месяцы также в разной степени включается в модели (кроме Курска).

Теперь об осадках. По своей природе содержание продуктивной влаги в слое 0-20 см должно хорошо коррелировать с осадками предшествующих месяцев. Во все модели (за исключением Москвы) входят осадки за май, июнь, а также за зимние месяцы (кроме Армавира), что говорит о существенной роли зимних осадков для запасов продуктивной влаги (Sn) в июне.

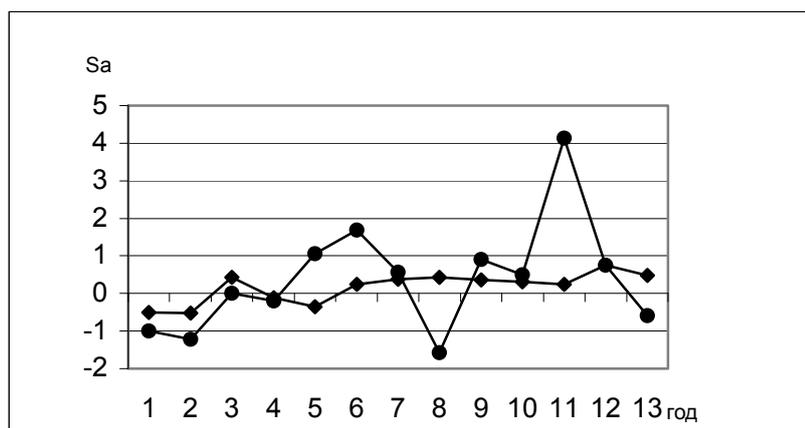
Описанные результаты регрессионной модели дают приблизительную оценку зависимой переменной от набора предикторов. Учитывая, что выборка данных составляет 30 случаев, более оптимальными будут модели с тремя предикторами.

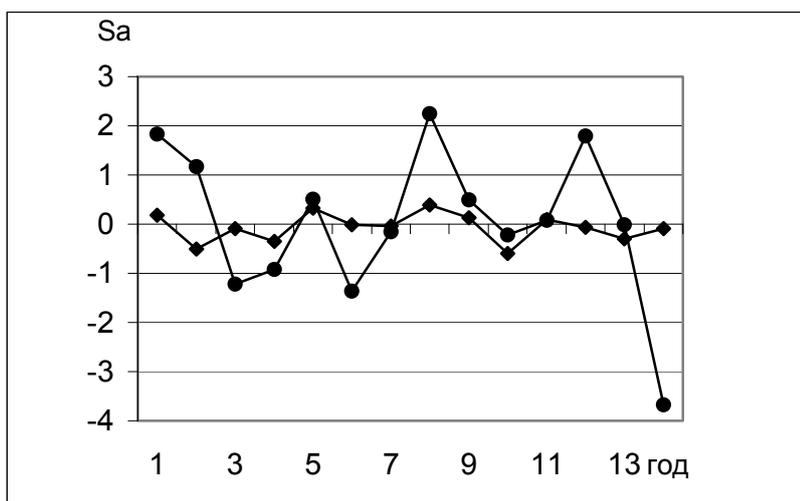
Следующим этапом работы было прогнозирование атмосферной засушливости с использованием авторегрессионной модели.

Учитывая большую сложность в прогнозе засух, как редкого явления, предпринимались попытки подойти к решению этой проблемы с различных точек зрения.

Располагая многолетними рядами Sa , была предпринята попытка дать прогноз по формальным методам. Для этого была выбрана авторегрессионная модель. Изучались свойства авторегрессионной модели для прогноза параметра засушливости Sa на год вперед для июля, августа и сентября в трех экономических районах России: Центральном, Центрально-Черноземном и Северо-Кавказком. Выбранная авторегрессия с порядком 6 прогнозировала параметр Sa для данного месяца на следующий год. Наиболее удачные прогнозы получились для Центрально-Черноземного экономического района. По знаку параметра засушливости Sa эти прогнозы выглядят удовлетворительными, однако, как в большинстве регрессионных методов неудачно прогнозируются величины Sa и, особенно, экстремумы, что видно из рис.1а, б, в. В июле совпадение по знаку Sa составило 75% (рис. 1а), в августе – 80% (рис. 1б), в сентябре – 60% (рис. 1в).

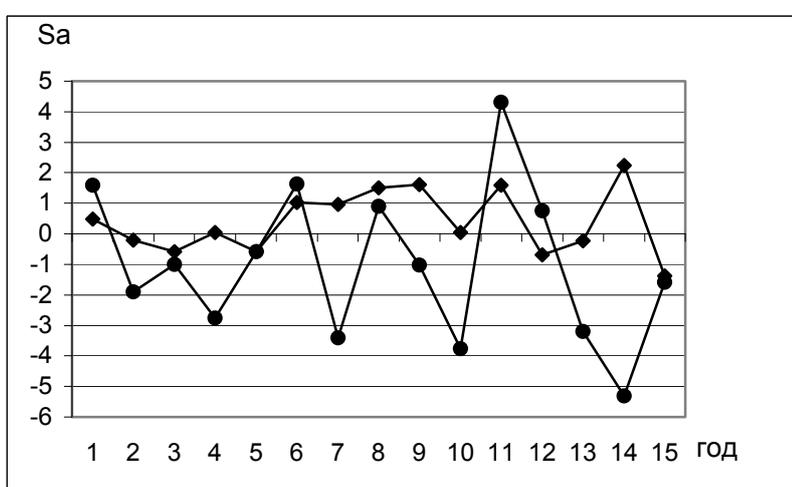
а
б





В

Рис.1. Совпадение по знаку Sa (%) по Центрально-Черноземному району для июля (а),



августа (б), сентября (в).

Таким образом, данный метод позволяет лишь качественно оценивать тенденцию засушливости от года к году.

Разработка усовершенствованного экспериментального метода прогноза атмосферной засушливости проводилась с помощью учета случайных и систематических ошибок прогноза.

В теплый период (апрель-сентябрь), начиная с 1992 г. по настоящее время, Гидрометцентр России (отдел долгосрочных прогнозов погоды) составляет прогнозы атмосферной засушливости (Sa) с нулевой заблаговременностью регрессионным методом с учетом месячных прогнозов аномалий температуры воздуха и осадков по 90 станциям бывшего СССР.

В выполненной ранее работе [3] анализировались потенциальные предикторы к прогнозу атмосферной засушливости (Sa). В ней определялись связи (ρ) атмосферной засушливости с гидротермическим коэффициентом Селянинова ($ГТК$), с температурой воздуха ($T^{\circ}C$), числом дней в месяце с $\Delta T = +5^{\circ}C$ и более, количеством осадков за месяц (R мм) и числом дней в месяце без осадков ($R=0$).

С целью дальнейшего усовершенствования метода прогноза атмосферной засушливости (Sa) и засух ($Sa \geq 2.0$) в этой работе был проведен анализ систематических ошибок оперативных прогнозов атмосферной засушливости (Sa) за период 1997-2002 гг. для апреля-июня по 40 станциям европейской территории России. Проведено сравнение прогнозов Sa с учетом поправок для независимых лет (1992-1995 гг.). Результаты продемонстрировали эффективность подобной процедуры. По общей оценке ρ качество

прогнозов Sa улучшилось для трех месяцев на 25%. Наибольшее повышение качества прогнозов наблюдалось в апреле, июне, а в мае результаты остались без изменения.

Главной особенностью введения поправки оказалась высокая предсказуемость случаев, когда величина $Sa \geq 2.0$, что характеризует засуху. Средняя оправдываемость (отношение числа станций в каждом прогнозе, на которых прогностическое значение Sa совпало с фактически наблюдавшимся, к общему числу станций с засухами) составила 32%. Если принять во внимание, что без учета поправок оправдываемость прогноза засух ($Sa \geq 2.0$) равнялась 0%, то улучшение оказалось существенным.

Разработана методика оценки значений Sa для каждой станции в отдельности.

Кроме этого, была пополнена информационная БД для авторских испытаний по усовершенствованию версии методики. Был дополнительно проведен анализ систематических ошибок оперативных прогнозов параметра атмосферной засушливости Sa за период 1997-2002 гг. для апреля-июня по 40 станциям бывшего СССР. Ошибки определялись для каждой станции в отдельности и вычислялись их средние значения $\bar{\delta}$, которые затем учитывались при составлении экспериментальных прогнозов атмосферной засушливости.

В табл. 2-4 приведены оценки прогнозов атмосферной засушливости на зависимом материале официальных прогнозов без поправок (Sa) и экспериментальных с поправками (Sa^1) за апрель-июнь 1997-2002 гг. и на независимом материале.

Обратимся к оценкам за апрель (табл.2). Средняя оценка официальных прогнозов (Sa) на зависимом материале составила $\bar{\rho}=0.19$ и $\bar{\theta}=1.57$. За этот же период оценка прогнозов, составленных с учетом поправок (Sa^1), имела $\bar{\rho}=0.63$ и $\bar{\theta}=1.52$. Для 1997 г. и 1998 г. введение поправок не изменило величины оценок по ρ , а по θ - ухудшило. Оценка независимых официальных прогнозов за 1995 г. оказалась лучше как по ρ , так и по θ (см.табл.1). Введение поправки в данном случае улучшения прогноза не дало.

Таблица 2

Оценка прогнозов атмосферной засушливости за апрель				
Год	Sa		Sa^1	
	ρ	θ	ρ	θ
<i>Оценка на зависимом материале</i>				
1997	0,72	1,67	0,71	2,88
1998	0,00	0,94	0,00	3,15
1999	0,13	1,93	1,00	0,46
2000	0,39	1,67	0,83	0,61
2001	0,27	1,20	0,54	1,27
2002	-0,40	2,62	0,71	0,78
Средняя	0,19	1,57	0,63	1,52
<i>Оценка на независимом материале</i>				
1995	0.69	0.68	0.60	1.29

В табл.3 представлены результаты оценки прогнозов атмосферной засушливости для мая на зависимом (1997-2002 гг.) и независимом (1992-1995 гг.) материалах. Средние оценки по ρ на зависимом материале для официального прогноза и прогноза с учетом поправки оказались хорошими ($\rho=0.37$ против 0.47). На независимом материале эти оценки низкие и близки между собой. Что касается средних оценок по $\bar{\theta}$, то они все ниже 1.0, а для уточненных прогнозов - ниже официальных. По результатам оценок отдельных лет уточненный прогноз на зависимом материале значительно лучше оправдался в 1999 г. и 2000

г., а на независимом – в 1992 г. и 1993 г. Исключение составляет 1995 г. (независимый прогноз), где уточненный прогноз оказался значительно хуже официального.

Таблица 3

Год	Sa		Sa^1	
	ρ	θ	ρ	θ
Оценка на зависимом материале				
1997	0,43	0,48	0,44	0,29
1998	1,00	0,34	0,94	0,30
1999	0,03	1,09	0,46	0,31
2000	0,25	1,30	0,44	0,65
2001	0,08	1,03	0,00	1,30
2002	0,55	0,72	0,55	0,44
Средняя	0,37	0,83	0,47	0,55
Оценка на независимом материале				
1992	0,15	1,03	0,29	0,77
1993	0,03	1,02	0,11	0,81
1994	0,00	1,09	0,03	0,98
1995	0,36	0,66	0,09	0,99
Средняя	0,14	0,95	0,13	0,89

В табл.4 приведены результаты оценки прогнозов атмосферной засушливости за июнь. Из анализа данных таблицы видно, что для всего зависимого ряда поправка к прогнозу атмосферной засушливости дает значительное улучшение оценок. Средние оценки для официального прогноза составили: $\bar{\rho}=0.49$ и $\bar{\theta}=1.28$, а для прогноза с поправкой: $\bar{\rho}=0.71$ и $\bar{\theta}=0.86$. Независимые прогнозы 1994 и 1995 г. также улучшились по ρ за счет поправки, чего нельзя сказать об оценке по θ . Для 1993 г. поправка дала отрицательный результат: $\rho=-0.18$, а $\theta>2.55$ (табл.4).

Таблица 4

Год	Sa		Sa^1	
	ρ	θ	ρ	θ
Оценка на зависимом материале				
1997	0,51	0,48	0,83	0,33
1998	0,89	1,07	0,94	0,86
1999	0,68	2,11	0,74	0,97
2000	0,11	2,59	0,37	2,21
2001	0,19	0,79	0,76	0,28
2002	0,53	0,64	0,61	0,52
Средняя	0,49	1,28	0,71	0,86
Оценка на независимом материале				
1993	0,15	1,58	-0,18	2,55
1994	0,18	1,22	0,24	2,28

1995	0,56	0,57	0,67	0,71
Средняя	0,30	1,12	0,24	1,84

Имея базу данных об атмосферной засушливости Sa и Sa^1 за апрель-июнь 1997-2002 гг. для каждого месяца и года были выбраны случаи с засухой - $Sa \geq 2.0$ и $Sa^1 \geq 2.0$.

Данные табл.5 позволяют провести анализ совпадения фактических атмосферных засух ($Sa \geq 2.0$) с прогностическими как без учета поправок, так и с их учетом на зависимом и независимом материалах за апрель-июнь по отдельным годам. В апреле засуха отмечалась на 3-17 станциях, а ожидалась на 0-6, при этом совпадение факта и прогноза было только в 1997 г. на одной станции и в 2000 г. на двух. С учетом поправки $Sa^1 \geq 2.0$ прогнозировалось на 29 станциях в 1997 г., на 15-19 - в период 1998-2001 гг. и на 4 - в 2002 г. Совпадение наблюдалось на 7-13 станциях в 1997г. и 1999-2001 гг., а в 1998 г. и 2002 г. - на 3 станциях в каждом из указанных лет.

Таблица 5
Совпадение фактически наблюдавшейся засухи ($S_i \geq 2.0$)
с прогнозируемой без поправок (Sa) и с их учетом (Sa^1)
на зависимом и независимом материалах
за апрель-июнь 1997-2002 гг.

Зависимый материал						Независимый материал					
год	факт	Sa		Sa^1		год	факт	Sa		Sa^1	
		прогноз	совпало	прогноз	совпало			прогноз	совпало	прогноз	совпало
АПРЕЛЬ											
1997	11	6	1	29	9	1995	28	0	0	15	14
1998	3	2	0	19	3						
1999	17	0	0	15	10						
2000	17	2	2	16	13						
2001	10	0	0	17	7						
2002	14	0	0	4	3						
МАЙ											
1997	9	2	1	7	6	1992	3	0	0	2	1
1998	10	10	3	12	6	1993	5	0	0	2	1
1999	6	1	1	6	5	1994	0	0	0	5	0
2000	3	0	0	1	1	1995	5	1	0	4	2
2001	6	0	0	1	0						
2002	10	1	1	6	5						
ИЮНЬ											
1997	7	6	1	8	1	1993	6	0	0	3	0
1998	19	5	2	8	4	1994	7	0	0	7	0
1999	18	8	3	13	11	1995	5	0	0	10	3
2000	16	9	2	16	7						
2001	6	0	0	1	1						
2002	7	1	0	9	3						

На независимом материале (1995 г.) по официальному прогнозу засуха не ожидалась, а фактически наблюдалась на 28 станциях. Прогноз с учетом поправки давал значения $Sa \geq 2.0$ на 15 станциях, а совпало на 14.

В мае параметр $Sa \geq 2.0$ отмечен на 3-10 станциях, по официальному прогнозу ожидался на 0-2, а в 1998 г. на 10 станциях. Совпадение произошло от 0 до 3 станций. Важно отметить, что поправка увеличила в прогнозе число станций с засухой от 1 до 12, а совпадение было на 1-6 станциях. В независимый период (1992-1995 гг.) по официальному прогнозу засуха ожидалась только в 1995 г. и на одной станции. С введением поправки $Sa \geq 2.0$ прогнозировалось от 2 до 5, а совпадение произошло в 1992 г. и 1993 г. по одной станции и в 1995 г. – на двух.

В июне засуха по официальному прогнозу не ожидалась в 2001 г., а в 2002 г. прогнозировалась только на одной станции. Во все остальные годы по прогнозу $Sa \geq 2.0$ должно было осуществиться на 5-9 станциях. Совпадение для этого месяца было на 1-3 станциях. Поправка к прогнозу увеличила число станций с ожидаемой засухой от 8 до 16, кроме 2001 г., в котором она ожидалась на одной станции. Совпадение было от 1 до 7 станций. Здесь выделяется 1999 г., в котором на 11 станциях было совпадение.

В независимые годы (1993-1995 гг.) $Sa \geq 2.0$ отмечалось в июне на 5-7 станциях, По официальному прогнозу засуха не ожидалась. По прогнозу с учетом поправки засуха прогнозировалась на 3-10 станциях, имела место только в 1995 г. на 3 станциях.

В качестве примера рассмотрим распределение атмосферной засушливости ($Sa \geq 2.0$) в апреле 2000 г. На рис. 2а представлен официальный прогноз Sa , на рис.2б – прогноз с учетом поправки, а на рис.2в - фактическое поле распределение Sa .

Сравнение этих рисунков указывает на явное преимущество прогноза с учетом поправок, что видно из табл.1. Официальный прогноз оправдался в первом случае только в Риге и Вильнюсе, а прогноз с поправкой на 13 из 17 станций.

Проведенные исследования позволили получить только предварительные результаты из-за короткого ряда имеющегося в нашем распоряжении материала. Работу в данном направлении целесообразно продолжить. При этом необходимо средние поправки уточнять ежегодно и составлять параллельно два вида прогнозов атмосферной засушливости с поправкой и без нее, выделяя при этом засухи ($Sa \geq 2.0$).

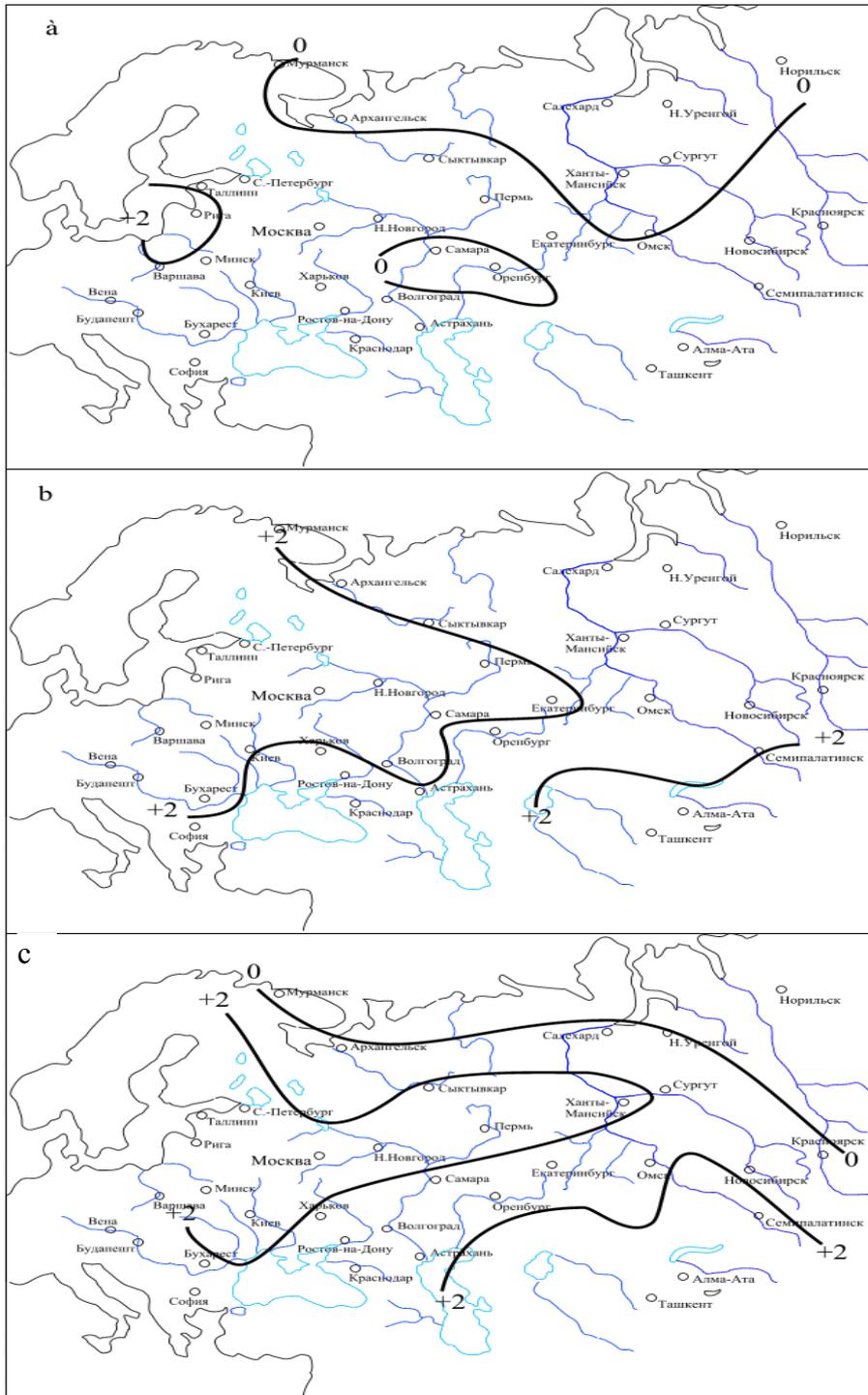


Рис.2. Распределение атмосферной засушливости (S_a) в апреле 2000 г.

Список литературы

1. Педь Д.А. О показателе засухи и избыточного увлажнения// Труды Гидрометцентра СССР.- 1975.- Вып.156.-С. 19-38.
2. Садоков В.П., Козельцева В.Ф., Кузнецова Н.Н. Исследование предикторов для прогноза атмосферных засух// Труды Гидрометцентра России.- 2002.- Вып. 337.- С.33-47.
3. Садоков В.П., Козельцева В.Ф., Кузнецова Н.Н. Образование атмосферно-почвенной засухи с учетом почвенной и атмосферной засушливости// Труды Гидрометцентра России.- 2002.- Вып. 337.- С.48-56.