

Улсын бүртгэлийн
дугаар

Нууцын зэрэглэл:

Аравтын бүрэн
Ангиллын код

Төсөл гүйцэтгэх гэрээний
дугаар: Шу/х/ОХУ/-2019/14

ШИНЖЛЭХ УХААН, ТЕХНОЛОГИЙН ИХ СУРГУУЛИЙН
НЭЭЛТТЭЙ БОЛОВСРОЛ ТӨВ

МОНГОЛ БОЛОН ЗҮҮН СИБИРИЙН ТОМООХОН НУУР, УСАН САН ОРЧМЫН ЦАГ УУРЫН БЭСРЭГ ХЭМЖЭЭСИЙН ПРОЦЕССИЙН СУДАЛГАА

Шинжлэх ухаан, технологийн төслийн тайлан
2020-2022

- Төслийн удирдагч:** Д.Ганбат – доктор (Ph.D), профессор
- Төслийн гүйцэтгэгч:** Г.Гантуяа – доктор (Ph.D), дэд профессор
С.Энхжаргал – докторант
Д.Одонтунгалаг – магистр
Н.Буянбилиг – магистрант
- Санхүүжүүлэгч байгууллага:** БШУЯ-ны Шинжлэх ухаан, технологийн сан
- Захиалагч байгууллага:** БШУЯ-ны Шинжлэх ухаан, технологийн бодлогын газар
- Гүйцэтгэгч байгууллага:** Шинжлэх ухаан, технологийн их сургууль
14191 Улаанбаатар, Сүхбаатар дүүрэг, 8-р хороо, Бага тойруу.
Утас: +976-9914-7004
Цахим хаяг: ganbatda@must.edu.mn
<http://www.must.edu.mn>

Хураангуй

Далай, тэнгисээс алслагдсан, өндөрлөг газарт орших Монгол орон болон Зүүн Сибирийн томоохон нуурууд нь бэсрэг хэмжээсийн болон орон нутгийн уур амьсгалыг бүрэлдүүлэгч чухал системийн нэг байдаг. Хиймэл дагуулын мэдээг боловсруулж харахад зуны улиралд хур тунадасны хэмжээ Байгаль нуурын мандал дээр эргэн тойрноосоо бага ордог байна. Энэхүү бууралт нь нуураас үүдэлтэй агаар мандлын өөрчлөлтөөс үүдэлтэй эсэхийг судлахын тулд 2005-2019 оны 15 жилийн хугацаанд тоон загварчлалын симуляци гүйцэтгэв. Бүс нутгийн уур амьсгалын хоёр симуляцийг нэг нь нуурыг ойгоор орлуулж хийсэн. Симуляцаас харахад нуур нь зуны улиралд орох хур тунадасны хэмжээг 13%-иар бууруулдаг нь харагдав. Нуур нь өдрийн цагаар гадаргын ойролцоох агаарын температурыг бууруулж, нуурын дээгүүр агаар мандлын илүү тогтвортой нөхцөлийг бий болгодог. Суларсан конвекцийн хамт дулааны далд урсгал багасч, нуурын дээгүүр чийг буурдаг. Нуурын нөлөөгөөр тунадасжих усны хэмжээ багасч, конденсаци нь доош чиглэсэн богино долгионы цацрагийг ихэсгэдэг бөгөөд энэ нь нуур дээрх конвекцийн сулралыг хэсэгчлэн нөхөх чадвартай. Төслийн тавьсан зорилтын хүрээнд судалгааг гүйцэтгэлээ.

Тайлан өмчлөгч: Шинжлэх Ухаан, Технологийн Их Сургуулийн Нээлттэй боловсрол төв

Түлхүүр үгс: тоон загварчлал, симуляци, бэсрэг процесс, агаар мандал нуурын харилцан үйлчлэл, нуур.

Гарчиг

Хураангуй.....	1
Түлхүүр үгс	2
I Бүлэг Сэдвийн судлагдсан байдал	4
1.1 Монгол болон Зүүн Сибирийн томоохон нуур, усан сангийн агаар мандлын бэсрэг хэмжээсийн процесст үзүүлэх нөлөө, тоон загварчлалын аргаар судалсан байдал	4
II Бүлэг Байгаль нуурын зуны хур тунадасны уур амьсгал, бэсрэг хэмжээсийн процесст үзүүлэх нөлөөллийг тоон загварчлалын аргаар судлах нь	10
2.1 Судалгааны ажлын зорилт	10
2.2 Судалгааны арга зүй	10
2.2.1 Тоон загварын тохируулга, ашигласан мэдээ.....	10
III Бүлэг Монгол орны томоохон нуурууд болон Зүүн Сибирийн Байгаль нуурын бэсрэг хэмжээний процесст үзүүлэх нөлөөллийг тоон загварчлалын аргаар судалсан үр дүнгээс	19
3.1 Зүүн Сибирийн Байгаль нуур.....	19
3.2 Монгол орны их нууруудын хотгор дахь томоохон нуурууд	31
IV Бүлэг Судалгааны үр дүнг эрдэм шинжилгээний хурал, бүтээлд хэвлүүлсэн байдал	40

I Бүлэг Сэдвийн судлагдсан байдал

1.1 Монгол болон Зүүн Сибирийн томоохон нуур, усан сангийн агаар мандлын бэсрэг хэмжээсийн процесст үзүүлэх нөлөө, тоон загварчлалын аргаар судалсан байдал

Бусад төрлийн газрын гадаргатай харьцуулахад дэлхийн гадаргын 4%-ийг эзэлдэг нуур, усан сан нь бүс болон орон нутгийн цаг агаар, уур амьсгалыг бүрдүүлэхэд мэдэгдэхүйц нөлөө үзүүлдэг. Нуур нь нуурын гадарга болон гадаргаас дээшхи агаар мандал болон ойролцоох гадаргын агаарын температурын хэлбэлзлийг бууруулдаг, учир нь усны дулааны багтаамж нь хүрээлэн буй газар болон агаарынхаас их байдаг тул гадаргуугаас идэвхтэй ууршилт явагдсанаар дээрх агаар мандалд усны уурын хэмжээг нэмэгдүүлэх боломжтой. Нуур болон түүний эргэн тойрон дахь дулаан, чийгшлийн ялгаатай байдлаас шалтгаалан нуур нь түүний эргэн тойрон дахь цаг агаар, уур амьсгалыг өөрчилдөг.

Хэдийгээр дулааны болон чийгшил нь тодорхой ялгаатай боловч ажиглалтын аргаар нуурын нөлөөг судлах нь тийм ч хялбар биш юм (Scott & Huff 1996). Цаашилбал, нууруудын цаг агаар, уур амьсгал, бэсрэг хэмжээсийн процесст үзүүлэх нөлөөллийн талаархи зарим тоон судалгаагаар нуураас үүдэлтэй цаг агаар, уур амьсгалын өөрчлөлт нь улирал, нуурын газарзүйн байршил зэрэг хүчин зүйлээс хамаарч өөр өөр байдаг. Нуурын гадаргууд буух хур тунадасыг авч үзвэл, нуурын агаар мандал нь өвлийн улиралд эргэн тойрныхоо газрынхаас илүү дулаан, чийглэг байдаг тул нуурын дээгүүр конвекц идэвхжиж, нуурын салхины доод талд цас ордог. Үүнийг “lake effect snow” гэж нэрлэдэг ба дэлхийн дундад болон өндөр өргөрөгийн олон нууранд ажиглагддаг (жишээ нь, Peace & Sykes 1966; Steenburgh et al. 2000). Тоон загварчлалын судалгаагаар зуны сүүлч намрын эхээр Оросын Ладога нуурын нөлөөгөөр хур тунадас 20-40% нэмэгддэгийг харуулжээ (Samuelsson et al. 2010). Өвлийн хугацааны хур тунадас Америкийн Их Нуурууд орчимд нуурын нөлөөгөөр 2 дахин хүртэл нэмэгддэг байна (Scott and Huff 1996). Эдгээр дурдагдсан судалгаануудаас харахад нуурын нөлөө газар бүрт хугацаанаас хамаарч харилцан адилгүй болох нь харагдаж байна.

Зуны улиралд нууруудын хур тунадасны нөлөөллийг зөвхөн ажиглалтаар тодорхойлоход харьцангуй хэцүү байдаг, учир нь өвөлтэй харьцуулахад

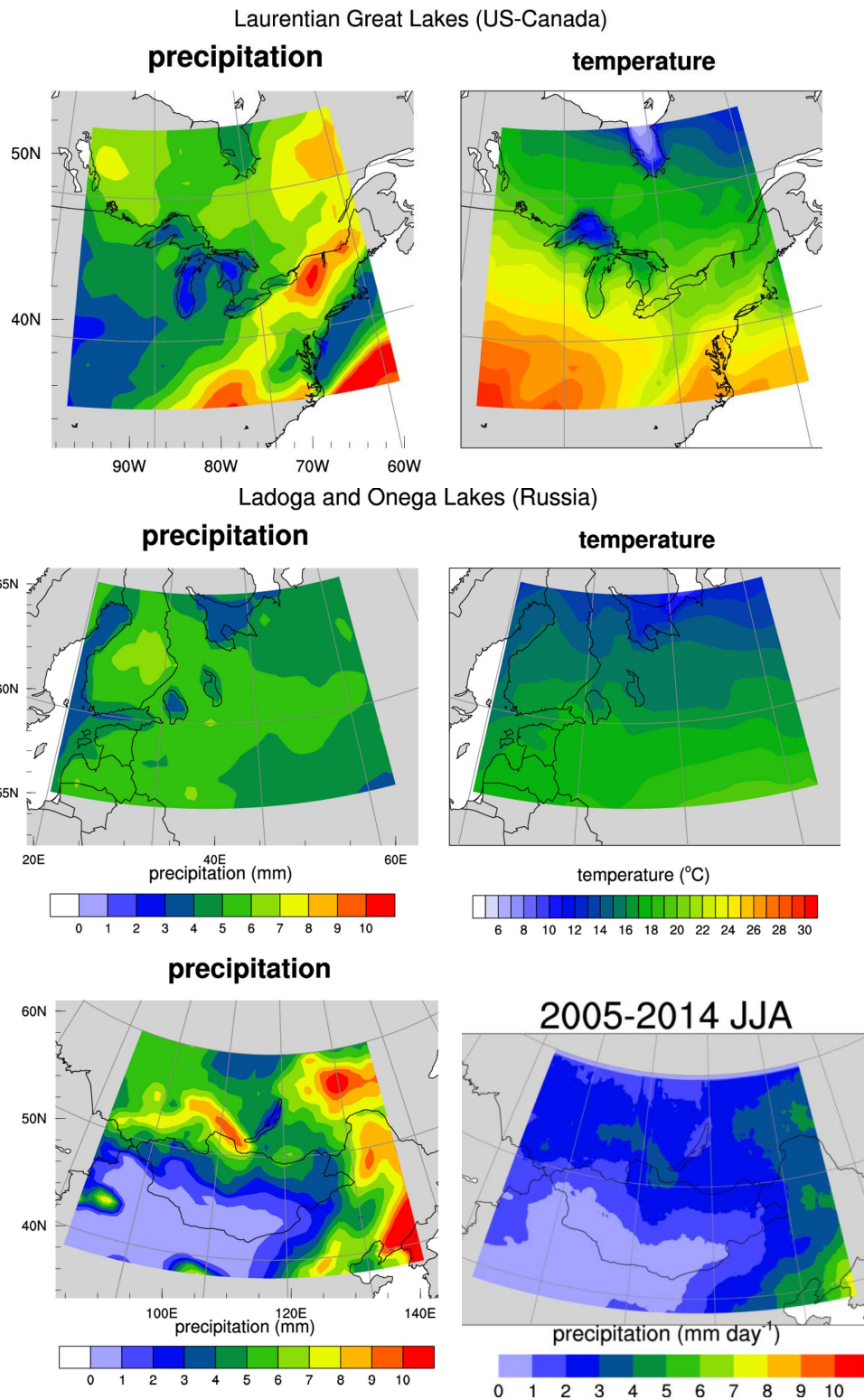
тодорхой үзэгдэл, физик процессуудын нарийн төвөгтэй байдаг. Тоон загваруудын тусламжтайгаар өмнөх зарим судалгаагаар зуны улиралд нуурууд дээрх хур тунадасны хэмжээ ойр орчмын нутгаас бага байгааг харуулсан байдаг (Хойд Америк дахь Их нуурууд: Notaro et al. 2013; Хятад дахь Тайху нуур: Gu et al. 2016). Эдгээр нууруудын зуны хур тунадасны бууралт нь гол төлөв нуурын гадаргын усны доод температуртай холбоотой илүү тогтворжсон уур амьсгалтай холбоотой бөгөөд энэ нь нуурын дээд үүсэх конвекцийг дарангуйлдаг. Гэсэн хэдий ч бусад судалгаанууд дээр дурдсан уур амьсгал нь тогтворшил бага байдаг Африкийн Их нуурууд (Thierry et al. 2015) зэрэг нууруудын хувьд дулаан улиралд нуур дээрх хур тунадасны хэмжээ нуурууд өөрсдөө нэмэгддэг болохыг харуулсан тоон загварын үр дүнг танилцуулсан байдаг (Verburg & Antenucci 2010). Дифференциал халаалт, ууршилт, конвекц, цацрагийн процессуудын нарийн төвөгтэй харилцан үйлчлэл нь нууруудын бэсрэг хэмжээний агаар мандлын процесст үзүүлэх нөлөөг ойлгоход төвөгтэй болгодог. Нуураас үүдэлтэй бэсрэг хэмжээний өөрчлөлтүүд хэвтээ ба босоо чиглэлд хэр зэрэг үргэлжлэх нь бас тодорхойгүй байдаг.

Ажиглалт, хэмжилтийн болон зайнаас тандан судлалын аргаар нуур, усан сангуудын агаар мандлын бэсрэг хэмжээний процесст үзүүлэх нөлөөллийг тодорхойлоход төвөгтэй, нарийн бус байдаг тул гадны орнуудын томоохон нууруудын нөлөөг тоон загварчлалын аргаар нилээн судалж байна (Kourzeneva et al. 2008; Gula and Peltier 2012; Thierry et al. 2015). Тухайлбал, Зүүн Африкт орших Танганика нуурын судалгаагаар нууцлагдмал болон ил дулааны урсгал жилд дунджаар 13%-18%-иар багассанаар нуурын дээр болон эргэн тойронд агаарын тогтворгүй төлөв байдлыг үүсгэдэг байхад Хойд Америкийн Их Нууруудад орших нуурууд зуны хугацаанд агаар мандлыг илүү тогтвортой төлөв байдалд оруулдаг байна (Verburg and Antenucci 2010). Нуурууд агаарын температурт харилцан адилгүй нөлөө үзүүлдэг. Жишээ нь, 7-р сард Канадын Great Slave болон Great Bear нуурууд ойр орчмын газар нутгаасаа 4°C-аар бага байдаг (Long et al. 2007) байхад Өмнөд Финляндын нуурууд жилийн туршид ойр орчмын температураас үргэлж дулаан байдаг байна (Samuelsson et al. 2010).

1-р зургаас харахад хиймэл дагуулын мэдээг боловсруулсан PERSIAN-CDR болон Европын Дунд хугацааны прогнозын төвийн ERA-INTERIM реанализ мэдээг Америкийн Их нуурууд, ОХУ-ын Ладога, Онега нууруудын орчмын бүс нутгаар зурж харахад нууруудын гадаргын температур нуурын эргэн тойрны

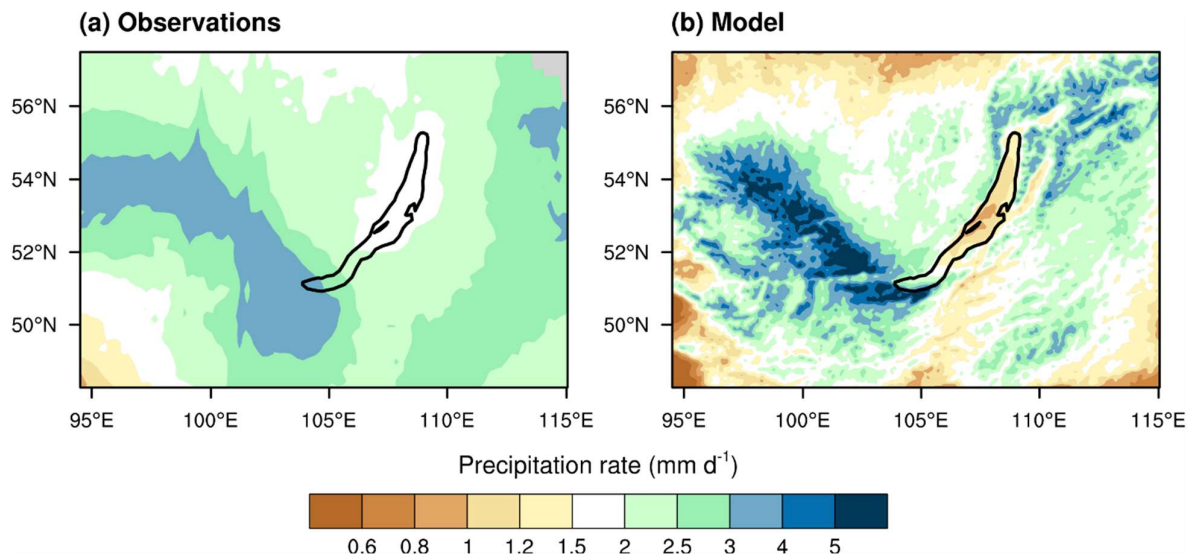
газар нутгийнхаас 2-8°C-аар бага, хур тунадас бага унадаг нь тодорхой харагдаж байна. Далай, тэнгисээс алслагдсан, өндөрлөг газарт орших Монгол орны хувьд бүсийн болон орон нутгийн уур амьсгалыг бүрэлдүүлэгч чухал системийн нэг нь нуур юм. Түүнчлэн, 1-р зургаас Байгаль нуур орчимд зуны хугацаанд хур тунадас эргэн тойрныхоосоо бага, Их нууруудын хотгорт хур тунадасны тархац мэдэгдэхүйц ялгаатай байгаа нь тодорхой харагдаж байна. Энэхүү хур тунадасны ялгаатай байдлын талаар физик тайлбар хангалттай хийгдэж байгаагүй юм. Цаг агаарын болон уур амьсгалын тоон загваруудад нуур, усан сангийн загварыг оруулснаар томхон нуур, усан сан бүхий газар нутагт газрын гадаргын температурт мэдэгдэхүйц өөрчлөлт өгдөг (Balsamo et al. 2012; Martynov et al. 2012). Сибирийн болон Монголын томоохон нууруудын агаар мандал, уур амьсгалын харилцан үйлчлэлийн талаар судалгаа, бэсрэг хэмжээний процесст үзүүлэх нөлөөллийн талаарх судалгааг өргөжүүлэх зайлшгүй шаардлагатай юм.

Байгаль нуур нь ОХУ-ын Сибирийн зүүн өмнөд хэсэгт орших цэнгэг устай нуур бөгөөд төв нь 53.3°N, 108.0°E-т байрладаг. 25-30 сая жилийн өмнө үүссэн Байгаль нуур нь дэлхийн хамгийн том, хамгийн гүн нь 1642 м гүн нуур юм. 23600 км³ эзэлхүүнтэй, эзлэхүүн нь Хойд Америкийн Их нууруудын эзлэхүүнийг нийлүүлснээс их байна (Dabaeva et al. 2016). Ихэвчлэн хаврын сүүл хүртэл мөсөөр хучигдсан байдаг ба нуурын гадаргын температур зуны улиралд ч тийм өндөр байдаггүй, голчлон гүн, газарзүйн байршлаас шалтгаалж нуур болон ойролцоох газрын гадаргуугийн температурын ялгаатай байдал бий болдог.



Зураг 1. Хиймэл дагуулын мэдээгээр боловсруулсан хур тунадас, температурын орон зайн тархалт. Америкийн Их нуурууд (дээд хэсэг) болон ОХУ-ын Ладога, Онега нуурууд (дунд хэсэг). Монгол, Байгаль нуур орчмын хур тунадас, температурын орон зайн тархалт (доод хэсэг)

Байгаль нуур болон ойр орчмын бүсийн хур тунадасны тархалтын шинж чанарыг ойлгохын тулд өндөр нягтралтай хур тунадасны мэдээллийг өгдөг хиймэл нейроны сүлжээ-Уур амьсгалын мэдээллийн сан (PERSIANN-CDR, Hsu et al. 1997) ашиглан зайнаас тандан судлалын мэдээллээс хур тунадасны тооцооллыг гарган авч болно. PERSIANN-CDR хур тунадасны мэдээлэл 60°S-60°N өргөргийн зурвасыг хамрах ба Байгаль нуур болон ойр орчмын бүсийн хур тунадасны өндөр нарийвчлалтай өөр мэдээлэл байхгүй тул энэхүү судалгаанд ашигласан болно. 2005-2019 оны 15 жилийн хугацаанд PERSIANN-CDR мэдээллийн багцад хийсэн дүн шинжилгээ нь Байгаль нуурын зундаа орох хур тунадасны хэмжээ ойр орчмын газар нутгийнхаас бага, харин нуурын хойд хэсэгт энэ бууралт илүү тод ажиглагдаж байгааг харуулж байна (Зураг 2а). Гэсэн хэдий ч нуурын мандал дээрх хур тунадасны хэмжээ буурсан нь зөвхөн нууртай холбоотой эсэхийг үнэлэхэд хэцүү байдаг, учир нь ийм бууралт нь хүрээлэн буй уулстай харьцуулахад харьцангуй нам дор газар зэрэг газарзүйн шинж чанараас шалтгаалж болно.



Зураг 2. 2005-2019 оны 6, 7, 8-р саруудын дундаж (а) PERSIANN-CDR хур тунадасны тооцоолол ба (б) тоон загварын симуляци (LAKE)-аас авсан гадаргын хур тунадасны хэмжээ

Дэлхийн агаар мандал сүүлийн 100 гаруй жилийн хугацааны аж үйлдвэрийн хурдацтай хөгжилтэй холбоотойгоор огцом дулаарч байгаа ба энэ уур амьсгалын өөрчлөлт нь өндөрлөг, далайн эргээс хол, хуурай газарт мэдэгдэхүйц ажиглагдаж байна. Газар болон усны гадаргын температурын өөрчлөлт нь нуурын усны стратификаци, цаашлаад биологийн процесс,

экосистемд нөлөөлдөг. Уур амьсгалын одоо болон ирээдүйн төлөв, өөрчлөлт нуур, түүний орчинд хэрхэн нөлөөлөх, эргээд энэ өөрчлөлт уур амьсгалд ямар нөлөөтэй болохыг судлах зайлшгүй шаардлагатай.

Энэхүү судалгааны ажлаар Сибирь болон Монголын томоохон нуурууд болох Байгаль, Их нууруудын хотгорт байрлах нууруудын бэсрэг хэмжээсийн агаар мандалд үзүүлэх нөлөөг тоон загварчлалын аргаар судлах үндсэн зорилт тавив.

II Бүлэг Байгаль нуурын зуны хур тунадасны уур амьсгал, бэсрэг хэмжээсийн процесст үзүүлэх нөлөөллийг тоон загварчлалын аргаар судлах нь

2.1 Судалгааны ажлын зорилт

Хамтарсан төслийн хүрээнд дараахь зорилтуудын дагуу судалгааны ажил гүйцэтгэнэ. Үүнд:

- Монгол орны Их нууруудын хотгор, Сибирийн нууруудын төлөөлөл болсон Байгаль нуур орчмын бүсээр нуур-агаар мандлын термогидродинамик параметризацийг агуулсан агаар мандлын тоон загварыг тохируулах, мужийн оновчтой сонголт, физик схемүүдийг тохируулах, сонгох.
- Нуур-агаар мандлын термогидродинамик параметризацийг агуулсан агаар мандлын тоон загварыг Байгаль болон Монгол орны томоохон нуурууд дээр хамгийн их хур тунадас ордог зуны хугацаагаар ажиллуулан, үр дүнд анализ хийх.
- Сибирь болон Монголын томоохон нууруудын агаар мандлын хязгаарын үе давхарга, бэсрэг хэмжээсийн процесс, зуны хугацааны хур тунадаст үзүүлэх нөлөөг судална. Нууруудын агаар мандал, цаг агаарын элементүүдэд үзүүлэх нөлөөний талаар физик тайлбарыг хийх.
- Шинжлэх ухааны энэ чиглэлийн хамтарсан судалгаа хөгжихөөс гадна судалгааны ажлын үр дүнгээ олон улсын мэргэжлийн хурлуудад хэлэлцүүлж, эрдэм шинжилгээний олон улсын сэтгүүлд өгүүлэл бэлтгэж хэвлүүлнэ.

2.2 Судалгааны арга зүй

2.2.1 Тоон загварын тохируулга, ашигласан мэдээ

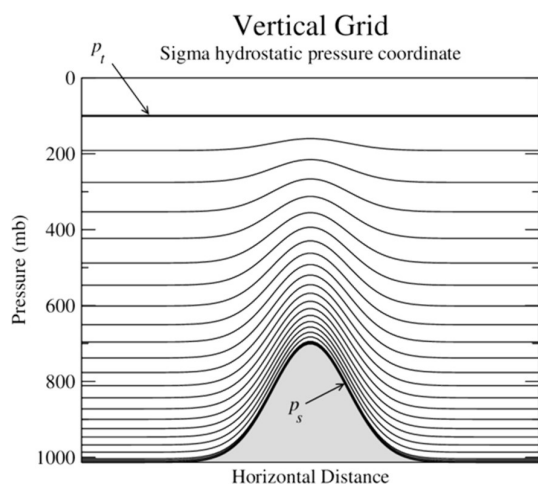
Энэхүү судалгаанд WRF загварын 4.2.1 хувилбарыг (Skamarock et al. 2019) ашигласан. Агаар мандлын судалгаа, цаг агаарын тоон прогнозад хэрэглэгддэг WRF загвар нь цаг агаарыг урьдчилан тооцоолоход өргөн хэрэглэгддэг бөгөөд агаар мандлын судалгаанд нэн тохиромжтой загвар юм. Түүнчлэн гадаргын өөрчлөлтийн агаар мандалд үзүүлэх нөлөөг судлахад өргөн хэрэглэгддэг загвар учраас тус судалгааны ажилд сонгов.

(а) Тоон загвар. Загварын өгөгдөл, тооцоолол хэвтээ болон босоо координатын гридийн цэгүүд дээр хийгддэг. Загварын босоо координат нь даралтаас хамаарах ба газрын гадаргаас эхэлсэн доод түвшиндээ газрын гадаргын хотгор гүдгэрийг дагах бөгөөд дээшлэх тусам хавтгай гадаргуу үүсэх онцлогтой эта-координат ашигладаг (томъёо 2.1, зураг 3).

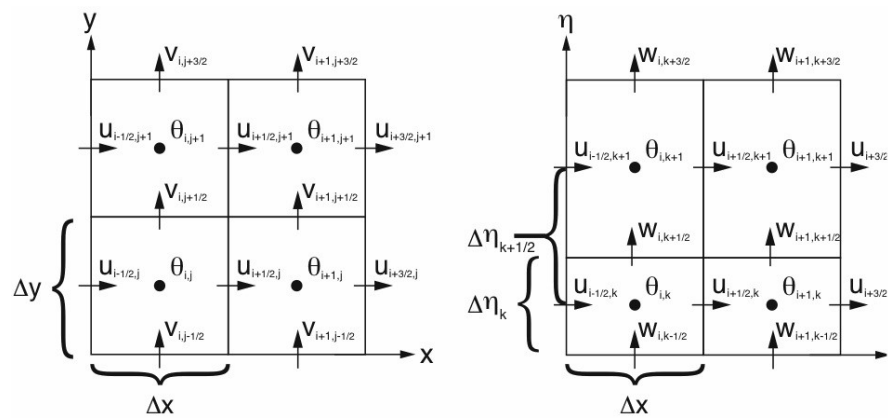
$$\eta = (p_h - p_{ht}) / (p_{hs} - p_{ht}) \quad (2.1)$$

энд: p_{hs} , p_{ht} нь харгалзан загварын газар болоод хамгийн дээд түвшний даралтын утга бөгөөд p_h – гидростатик даралт. η -гийн утга 0-ээс 1 утгатай байна. Загварын хэвтээ координат адил алхамтай гридүүдээс тогтох бөгөөд хувьсагчаас шалтгаалж бүтэн гридийн болон хагас гридийн цэгүүд дээр тооцоолол хийгддэг (зураг 4). WRF загварын үндсэн тэгшитгэлийн систем дараахь хэлбэртэй.

$$\begin{aligned} \partial_t U + (\nabla \cdot \mathbf{V}u) - \partial_x(p\phi_\eta) + \partial_\eta(p\phi_x) &= F_U \\ \partial_t V + (\nabla \cdot \mathbf{V}v) - \partial_y(p\phi_\eta) + \partial_\eta(p\phi_y) &= F_V \\ \partial_t W + (\nabla \cdot \mathbf{V}w) - g(\partial_\eta p - \mu) &= F_W \\ \partial_t \Theta + (\nabla \cdot \mathbf{V}\theta) &= F_\Theta \\ \partial_t \mu + (\nabla \cdot \mathbf{V}) &= 0 \\ \partial_t \phi + \mu^{-1}[(\mathbf{V} \cdot \nabla \phi) - gW] &= 0 \end{aligned} \quad (2.2)$$



Зураг 3. WRF загварын босоо координат



Зураг 4. WRF загварын хэвтээ координатийн гридийн цэгүүд

Тэгшитгэлүүдийн баруун гар талд forcing term гэж нэрлэгдэх загварын физик хэсэг байх ба турбулент холигдол, сферийн проекц, дэлхийн эргэлт зэргийг авч үзнэ.

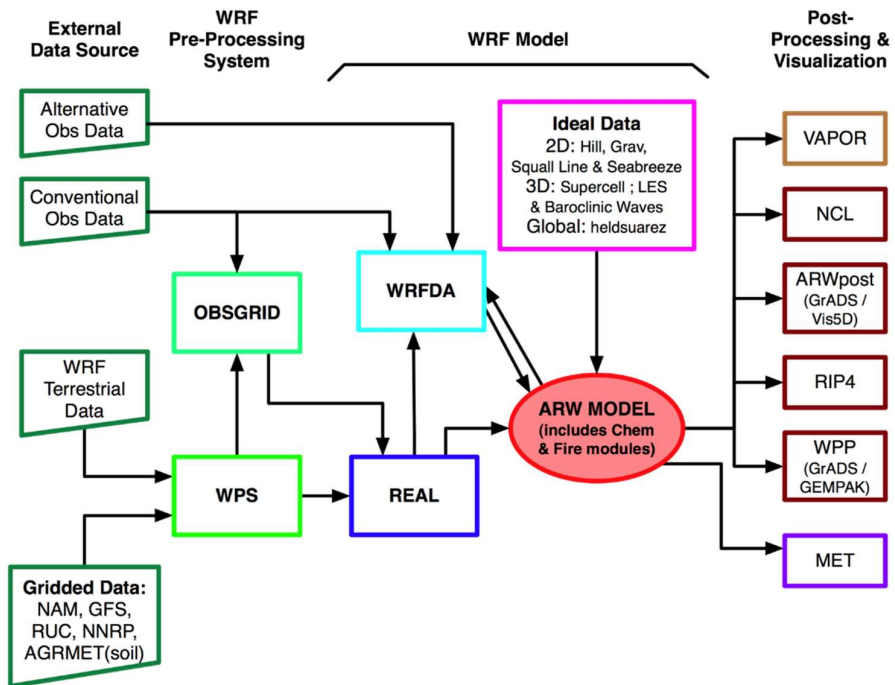
(b) Загварын тохиргоо. WRF загвар бүс нутгаас хамааран Монгол орныг бүрэн хамарсан, хэвтээ чиглэлд 3 км хүртэлх алхмын нарийвчлалтай, 42 босоо түвшнээр тооцоолсон ба туршилтын аргачлалыг доорх схемээр үзүүлэв (Зураг 5). Загварт хувилбар 4.5-аас эхлэн зарим өөрчлөлт (Gu et al., 2015) хийгдсэн ба нуурын загварыг ашиглах боломжтой болсон. Нуурын загвар нь нуурын усны 1 хэмжээст баганыг 10 давхаргад хуваадаг бөгөөд босоо түвшнүүдийн зай гүнээс хамааран экспоненциалаар нэмэгддэг.

6-р зурагт сонгон авсан тооцооллын мужууд болон бүс нутгийн газар бүрхэвчийн ангиллыг харуулав. Байгаль нуураас хойшхи газар нутаг урд хэсгийн газар нутгаа бодвол нам дор ба бут, мөнх ногоон шилмүүст ойгоор голдуу бүрхэгдсэн. WRF загвар нь физик процессуудын олон төрлийн схемүүдийн сонголттой ба төслийн төлөвлөгөөнд тусгагдсан ёсоор урьдчилсан олон тоон туршилт хийсний дараа агаар мандал болон газрын гадарга орчмын физик процессуудын параметризацийн схемүүдийг дараахь байдлаар сонгож тохируулав (Хүснэгт 1). Үүнд: хязгаарын үе давхаргын YSU (Hong et al. 2006), газрын гадаргын Noah (Tewari et al. 2004), кумюлюс үүлний Grell (Grell and Freitas, 2014), богино долгионы Goddard (Chou, 1999), урт долгионы RRTM (Mlawer et al. 1997) зэрэг. Загвар ажиллуулахад шаардлагатай захын болон анхдагч нөхцөлөөр 6 цаг тутмын, 1 градусын орон зайн нарийвчлалтай NCEP FNL реанализийн (Kalnay et al. 1996) мэдээг ашиглав. Байгаль нуурын мужийн симуляцийн тооцооллыг 2005-2019 оны 15 жилийн хугацааны зуны улирлаар (6, 7, 8-р саруудаар) гүйцэтгэсэн ба загварын бодолтыг зүгшрүүлэх шаардлагын улмаас жил бүрийн тооцоолол эхлүүлэх сараас долоо хоногийн хугацаанд нэмэлт бодолтыг явуулав. Бодолтын үр дүнгийн гаралтыг цаг тутмаар гаргав.

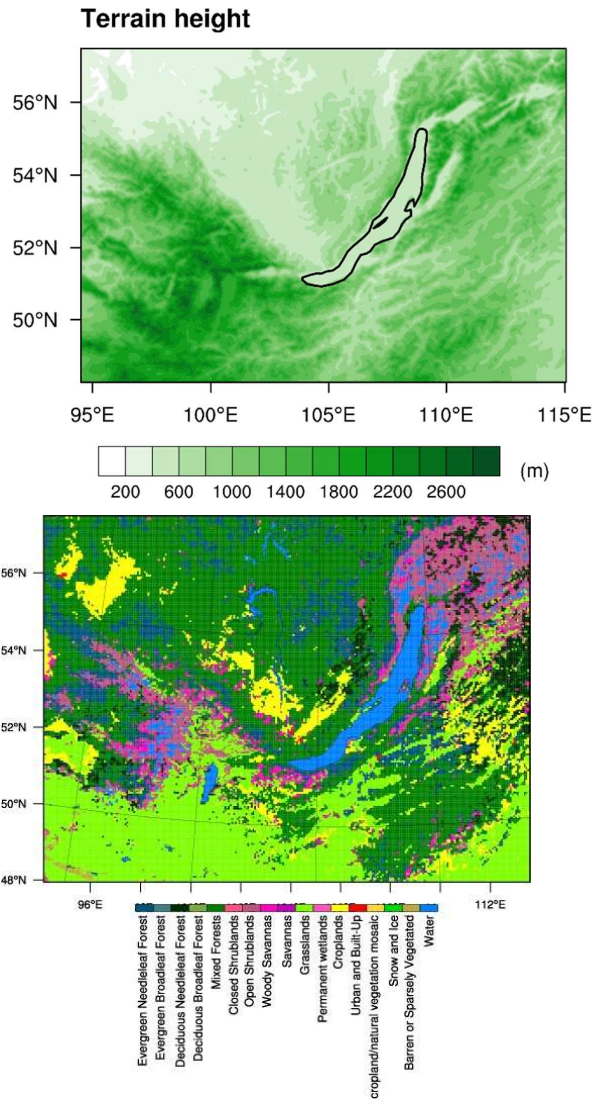
Хүснэгт 1 Судалгаанд ашигласан WRF загварын физик процессийн параметризаацийн сонголт

Physical process	Parameterization	Reference
Микрофизик	WRF single-moment 6-class (WSM6) scheme	Hong & Lim, 2006
Хязгаарын үе давхарга	Yonsei University (YSU) scheme	Hong et al., 2006
Радиац	Rapid Radiative Transfer Model GCM application (RRTMG)	Mlawer et al., 1997
Газрын гадарга	Noah land surface model	Tewari et al., 2004
Газар бүрхэвч	Revised MM5 scheme	Jiménez et al., 2012
Гридээс бага хэмжээст конвекц	Kain–Fritsch scheme	Kain, 2004

WRF Modeling System Flow Chart



Зураг 5. Мезомасштабын WRF загварын ажиллагааны схем



Зураг 6. Байгаль нуурыг багтаасан тооцооллын бүс нутаг болон газар бүрхэвчийн ангилал

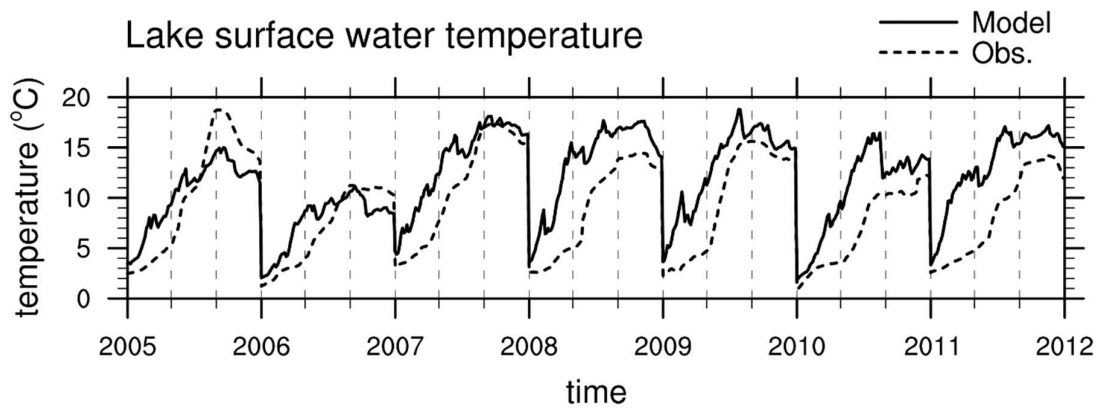
(с) Загварын тооцооллын муж. Байгаль нуур орчмын уулзүй болон газар бүрхэвчийн төрлийг 6-р зурагт харуулав. Байгаль нуур зүүн хойд талаараа Хянганы уулс, баруун өмнө хэсгээрээ Соёны уулстай залгаа оршдог. Нуурын баруун захаас эхлэн Сибирийн нам дор газар үргэлжилнэ. Тооцооллын үүрлэсэн хэлбэртэй хоёр мужийн хэвтээ гридийн нарийвчлал 15 ба 5 км болно. Мужуудын хэмжээ нь гадна мужийн хувьд 3000 км × 3000 км, дотоод мужийн хувьд 1545 км × 1050 км байна. Загварын дээд хэсэг нь 10 гПа, босоо давхаргын тоо нь 45. Тооцооллын 2-р муж Байгаль нуурыг бүхэлд нь хамарсан ба баруун талдаа Хөвсгөлийн уулсыг ахиухан багтаасан нь тоон загвараар тооцоолол хийхэд захын нөхцөлтэй холбоотойгоор тооцооллын алдаанаас сэрэмжилсэн болно. Мөн адил шалтгаанаас гадна талын тооцооллын мужид хол оршин усан гадарга аль болох бага оруулахаар тохируулсан. 6-р зурагт Байгаль нуур орчмын уулзүй болон гүний зургуудыг харуулав. Байгаль нуур зүүн хойноос баруун өмнө сунаж тогтсон, хамгийн урт хэсгээрээ 636 км, өргөөшөө 79 км хүрнэ. Дундаж гүн 744.4 м, хамгийн гүн хэсэгтээ 1642 м хүрдэг. Байгаль нуур нь дэлхийн хамгийн гүн нуур юм. Гадаргын талбай 31722 км², гадаргын өндөршил далайн төвшнөөс дээш 455 м, нуурын ёроол 1186.5 м болно.

III Бүлэг Монгол орны томоохон нуурууд болон Зүүн Сибирийн Байгаль нуурын бэсрэг хэмжээний процесст үзүүлэх нөлөөллийг тоон загварчлалын аргаар судалсан үр дүнгээс

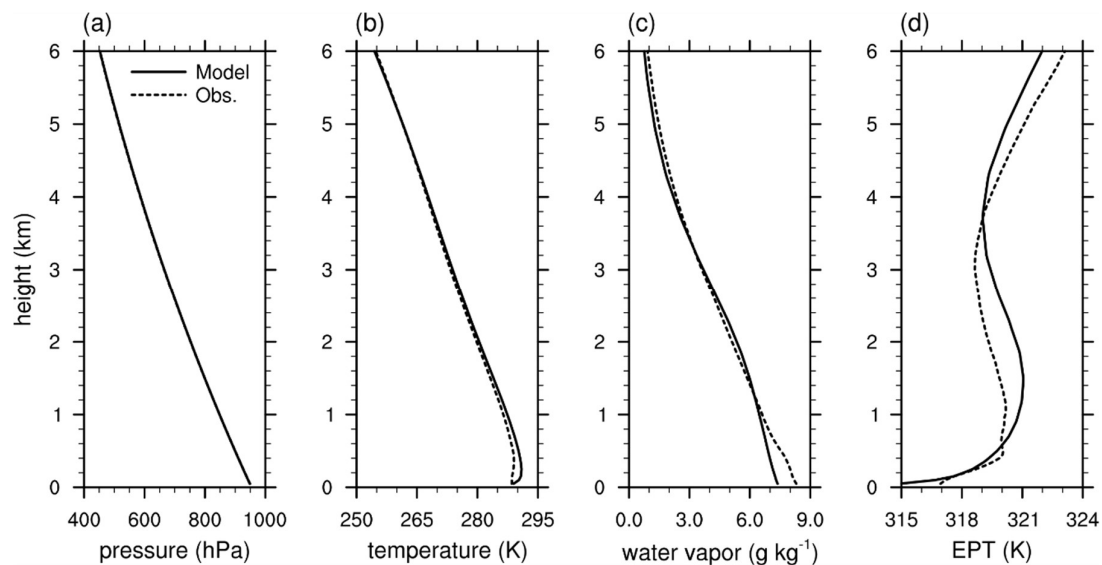
3.1 Зүүн Сибирийн Байгаль нуур

Загварын симуляцийн үр дүнг баталгаажуулахын тулд суурь симуляци болох LAKE симуляцийн үр дүнг хэд хэдэн төрлийн ажиглалттын утгатай харьцуулсан болно. Нэгдүгээрт, зуны улирлын хиймэл дагуулын мэдээллийг боловсруулж гаргасан гадаргын хур тунадасны хэмжээ нь загварын үр дүнд гарсан Байгаль нуурын зуны хур тунадасны шинж чанартай зохих ёсоор адил байгааг харуулж байна (Зураг 2). LAKE симуляцийн хур тунадасны хэмжээ нь PERSIANN-CDR хур тунадасны тооцоололтой бараг ижил масштабтай бөгөөд загвар нь орон зайн илүү нарийвчлалтай (5 км) байдаг тул загварчлалын орон зайн тархалт хур тунадасны тооцоололтой төстэй байна. Симуляцийн үр дүнг харахад нуурын дээгүүр хур тунадасны хэмжээ ойр орчмынхоос бага байгаа бөгөөд энэ бага хэмжээтэй хур тунадас нуурын хойд хэсэгт илүү тод ажиглагдаж байгаа нь хиймэл дагуулын мэдээний үр дүнтэй нийцэж байна. Нуурын хур тунадасны дундаж хэмжээ нь 1.37 мм/өдөр бөгөөд энэ нь нуурын баруун болон зүүн хойд хэсгийн уулархаг бүсүүдийн гуравны нэг орчим юм. NOLAKE симуляци нь нуурын эх газрын эргэн тойрон дахь хур тунадасны хурдыг мөн харуулж байгааг тэмдэглэж байна (зураг дээр харуулаагүй), энэ нь нуур байгаа эсэхээс бусад хүчин зүйлүүд, тухайлбал газрын гадаргын тогтоц зэрэг хүчин зүйлүүд ч мөн адил нөлөө үзүүлдэг болохыг харуулж байна.

Гадаргуугийн хур тунадасны хэмжээнээс гадна нуурын гадаргын усны температур (LSWT) болон даралт, температур, усны уурын хольцын харьцаа, эквивалент потенциал температурын (EPT) босоо тархалтын цаг хугацааны цувааг ажиглалттай харьцуулсан болно (Зураг 7, 8). Загварын үр дүнгээс харахад загвар нь зуны эхэн үед LSWT-ийг хэтрүүлэн үнэлэх хандлагатай байгаагийн учир нь нуур 5-р сарын сүүлээр ч гэсэн ерөнхийдөө мөсөөр хучигдсан байдагтай холбоотойгоор тайлбарлаж болно. Энэ ялгаанаас бусад тохиолдолд симуляцийн үр дүн ажиглагдсан шинж чанаруудтай хангалттай хэмжээгээр төстэй байна.



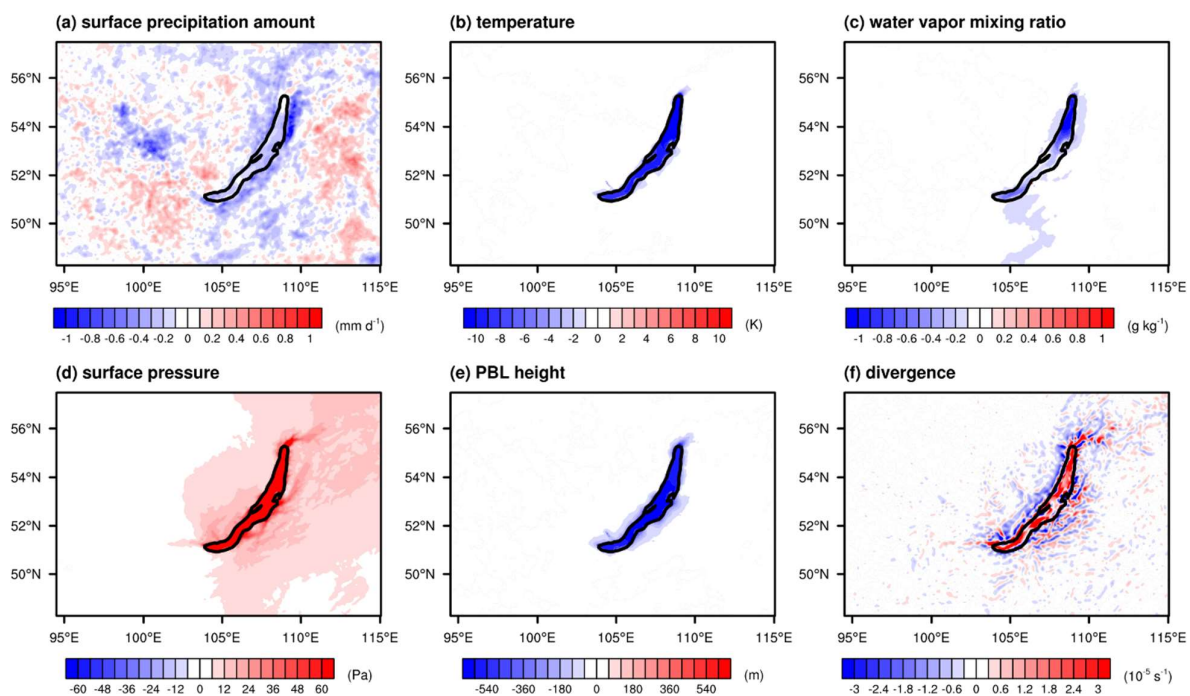
Зураг 7. Загварчлал (тасралтгүй шугам) болон ажиглалт (тасархай шугам)-ын 2005-2011 оны 6, 7, 8-р саруудын нуурын гадаргын усны дундаж температурын хугацааны цуваа. Ажиглалтын мэдээг 2012 оны 3-р сар хүртэлх Along-Track Scanning Radiometer (ATSR) Reprocessing for Climate: Lake Surface Water Temperature and Ice Cover (ARC-Lake) төслийн v3 (Merchant and MacCallum, 2018) дахин босгосон реанализийн сканнерийн радиометрээс (ATSR) авсан болно



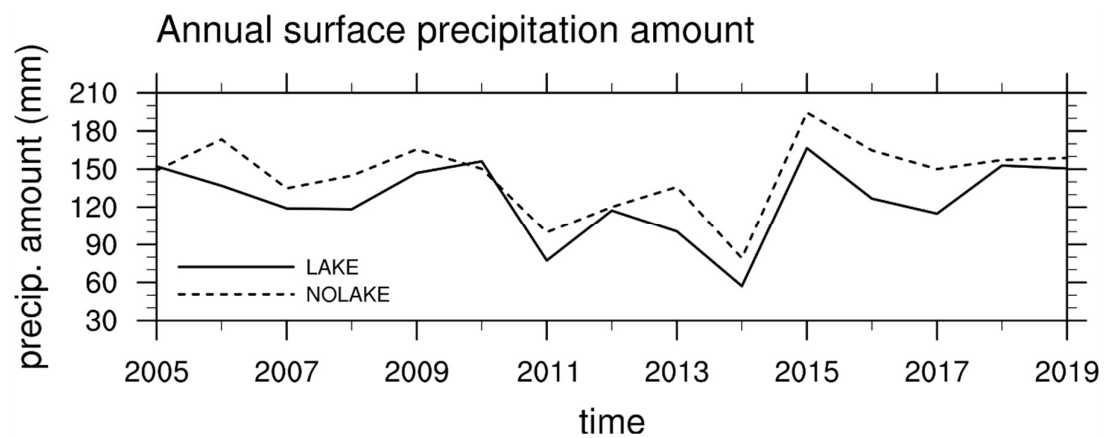
Зураг 8. Байгаль нуурын зүүн эргийн зэргэлдээх цэг дэх (Уст-Баргүзин, 53.41° , 109.01°) 2005, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2018, 2019 онуудын 6, 7, 8-р саруудын загварын симуляци (шүлүүн шугам) болон ажиглалтын (тасархай шугам) дундаж (a) даралт, (b) температур, (c) усны уур холилдох харьцаа, (d) эквивалент потенциал температурын босоо профиль. Босоо координат нь газрын түвшнээс дээш (AGL); нуурын гадаргуу дээрх өндөр нь тэг байна. Хэт олон дутуу ажиглалттай жилүүдийг дунджаас хассан болно

Нуурын мандал дээрх хур тунадасны бууралтад Байгаль нуур ямар хэмжээгээр нөлөөтэй байгааг LAKE болон NOLAKE симуляцийн үр дүнгийн хур тунадасны харьцуулалтаас харж болно (Зураг 9). Нуурын мандлын талбай дээрх хур тунадасны дундаж хэмжээ LAKE симуляцид NOLAKE симуляцийнхаас 13%-иар (0.21 мм/өдөр) бага байгаа нь зуны улиралд жилийн дундаж хур тунадасны хэмжээ 19 мм-тэй тэнцүү байна (Зураг 2а). LAKE, NOLAKE симуляцийн үр дүнг харьцуулахад зуны улиралд орох хур тунадасны хэмжээ 2005, 2010 онуудаас бусад онуудад LAKE симуляцид буурсныг харж байна (Зураг 10). Нуурын нөлөөгөөр хур тунадасны өөрчлөлт зөвхөн нуурын мандлаар хязгаарлагдахгүй, харин бүх бүс нутагт тархсан байна. Нуурын зүүн хэсэг болон зарим газарт хур тунадас NOLAKE симуляциас LAKE симуляцид илүү их байна. Эдгээр хэсгүүдэд яагаад хур тунадасны хэмжээ ихэссэнийг цаашид гүнзгийрүүлэн судлах шаардлагатай.

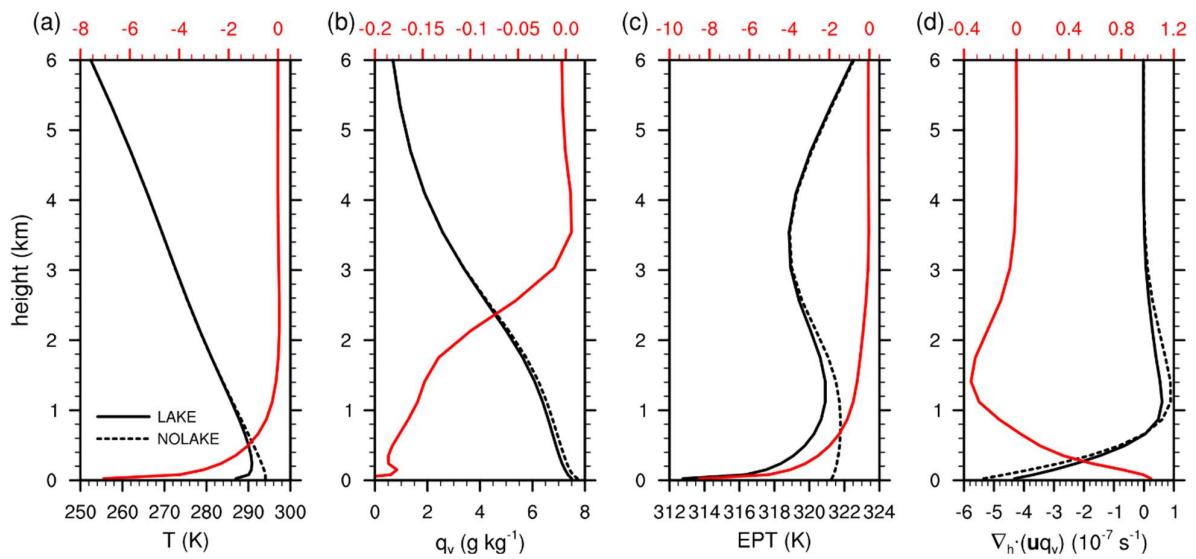
Нуурын нөлөөгөөр босоо чиглэлд үүссэн өөрчлөлтийг шинжлэв (Зураг 11). LAKE симуляцид нуурын гадарга болон босоо чиглэлд температур бага байх бөгөөд нуурын хөргөлтийн нөлөө $z \sim 2$ км хүртэл үргэлжилдэг. Усны уурын хольцооны харьцаа нь NOLAKE симуляцийг бодвол LAKE симуляцид мөн бага байна (Зураг 9с) ба ялгаа нь $z \sim 3$ км хүртэл харагдаж байна. LAKE симуляцийн энэхүү хуурай байдал нь нуурын мандал дээрх конвекцийг дарах ба усны уурын дээш тээвэрлэлтийг бууруулж, усны уур буюу ууршилтыг нуурын гадаргуугаас дээрх агаар мандалд үр дүнтэй нийлүүлдэггүй болохыг харуулж байна.



Зураг 9. LAKE болон NOLAKE симуляцийн (a) гадаргын хур тунадасны, (b) 2 метрийн агаарын температур, (c) 2 метрийн усны уурын хольцооны харьцаа, (d) гадаргын даралт, (e) хязгаарын үе давхаргын (PBL) өндөр, (f) дивергенцийн зөрөө (LAKE – NOLAKE)



Зураг 10. LAKE (тасралтгүй шугам) болон NOLAKE (тасархай шугам) симуляцийн жил бүрийн зуны (6, 7, 8-р сар) улирлын Байгаль нуурын талбайн дундаж хур тунадасны хэмжээ



Зураг 11. LAKE болон NOLAKE симуляцийн Байгаль нуурын талбай дээрх (a) температур, (b) усны уур холилтын харьцаа, (c) EPT, (d) усны уурын тээвэрлэлтийн хэвтээ дивергенцийн босоо профиль. Улаан шугам нь LAKE болон NOLAKE симуляцийн зөрүү утга. Босоо координат нь газрын түвшнээс дээш (AGL); нуурын гадаргуу дээрх өндөр нь тэг байна (Хэт олон дутуу ажиглалттай жилүүдийг дунджаас хассан болно).

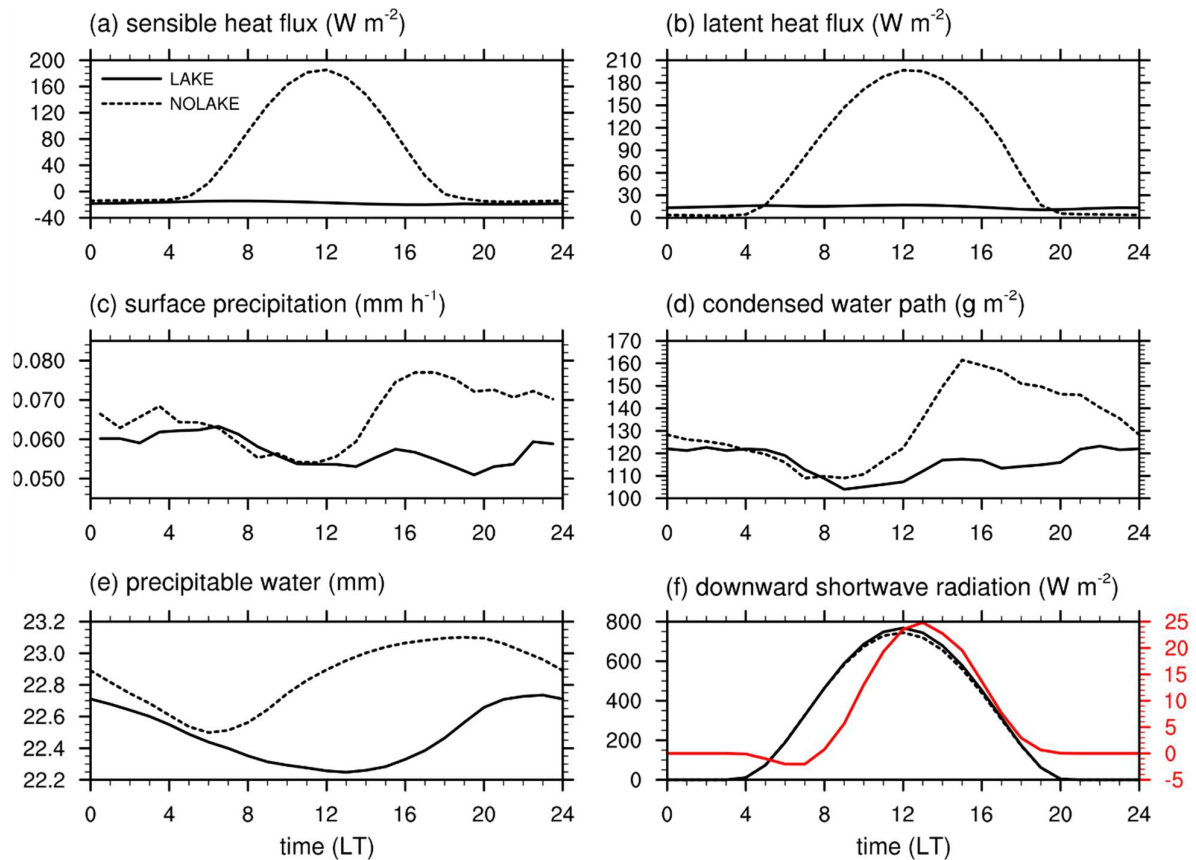
Нууран дээрх хур тунадасны хэмжээг Байгаль нуур ямар хэмжээгээр хариуцаж байгааг НУУР болон NOLAKE-ийн загварчлалын хур тунадасны харьцуулалтаас харж болно. Нуурын талбай дээрх дундаж хур тунадасны хэмжээ NOLAKE симуляцийнхаас 13%-иар (0.21 мм $d-1$) бага байгаа нь зуны улиралд жилийн дундаж хур тунадасны хэмжээ 19 мм-тэй тэнцүү байна (Зураг 2а). Зуны улиралд орох хур тунадасны хэмжээ буурсныг 2005, 2010 онуудаас бусад бүх загварчлалын хувьд жил хоорондын хэлбэлзэлтэй байсан ч харж байна (Зураг S4). Нуурын нөлөөгөөр хур тунадасны өөрчлөлт зөвхөн нуурын нутаг дэвсгэрээр хязгаарлагдахгүй, харин бүх бүс нутагт тархсан байна. Нуурын зүүн хэсэг гэх мэт зарим газарт хур тунадас NOLAKE симуляциас LAKE симуляцид илүү их байдаг. Нуур яагаад эдгээр газруудад хур тунадасны хэмжээг ихэсгэдэг вэ гэдгийг цаашид гүнзгийрүүлэн судлах шаардлагатай байна.

Зураг 11d-д усны уурын тээвэрлэлтийн хэвтээ босоо профайлыг харуулав. $\nabla h \cdot (uqv)$, энд ∇h нь хэвтээ del оператор, u нь салхины хэвтээ байгуулагч, qv нь усны уурын хольцооны харьцаа юм. Хоёр симуляцийн хувьд усны уур нь доод давхаргад ($z < 0.7$ км) нэгдэж, дээд давхаргад ($0.7 \text{ км} < z < 3.5 \text{ км}$) хуваагддаг бөгөөд энэ нь сав газрын топографийн ердийн шинж чанарыг илэрхийлдэг (жишээ нь, Satyamurty et al. 2013). Энэ нь NOLAKE симуляцид бас харагддаг тул энэ онцлог нь хоёр симуляцийн газарзүйн нийтлэг онцлогоос үүдэлтэй гэж үздэг. NOLAKE симуляцитай харьцуулахад доод давхарга дахь конвергенц ба дээд давхаргын ялгаа хоёулаа LAKE симуляцид сул байгаа нь нуур дээрх конвекц суларч байгааг харуулж байна. Түүнчлэн, нэгдэх давхарга дахь усны уурын тээвэрлэлтийн конвергенц нь NOLAKE загварчлалаас LAKE загварчлалд 20%-иар бага байна. Энэхүү сул байдал нь агаар мандлын доод хэсэгт байгаа конвектив энергийг багасгаж, улмаар конвекцийг улам сулруулж болзошгүй юм. Дээд давхарга дахь усны уурын тээвэрлэлтийн ялгаа буурах нь доод давхарга дахь усны уурын тээвэрлэлтийн конвергенцийн бууралтаас их байгаа нь багана дахь усны уурын хольцооны харьцааны хажуугийн урсгал нэмэгдэж байгааг харуулж байна.

Мэдрэг дулааны урсгал (sensible heat flux)-ын өдрийн өөрчлөлт нь LAKE симуляцид өдрийн турш мэдрэг дулааны урсгал нь доошоо (өөрөөр хэлбэл, агаар мандлаас гадаргуу руу) байгааг харуулж байна (Зураг 12а). LAKE симуляцид гадаргуугийн ойролцоох агаар мандал нь тогтвортой байдаг тул

нуурын дээгүүр конвекцийг бууруулах магадлал өндөр байдаг. Харин NOLAKE симуляцид мэдрэг дулааны урсгалын чиглэл нь өдрийн цагаар дээшээ (гадаргаас агаар мандал руу), шөнийн цагаар доошоо чиглэдэг. Нуур нь ууршилтыг нэмэгдүүлж улмаар дулааны далд урсгалыг нэмэгдүүлнэ гэсэн хүлээлтээс ялгаатай нь LAKE симуляцид ялангуяа өдрийн цагаар далд дулааны урсгал бага байдаг (Зураг 12b). LAKE симуляцийн дулааны далд урсгал (latent heat flux) бага байх үндэслэлтэй шалтгаан нь LAKE симуляцид конвекц харьцангуй сул байх бөгөөд энэ нь гадаргуугийн ойролцоо дээш чиглэсэн хөдөлгөөнийг сулруулдаг болно.

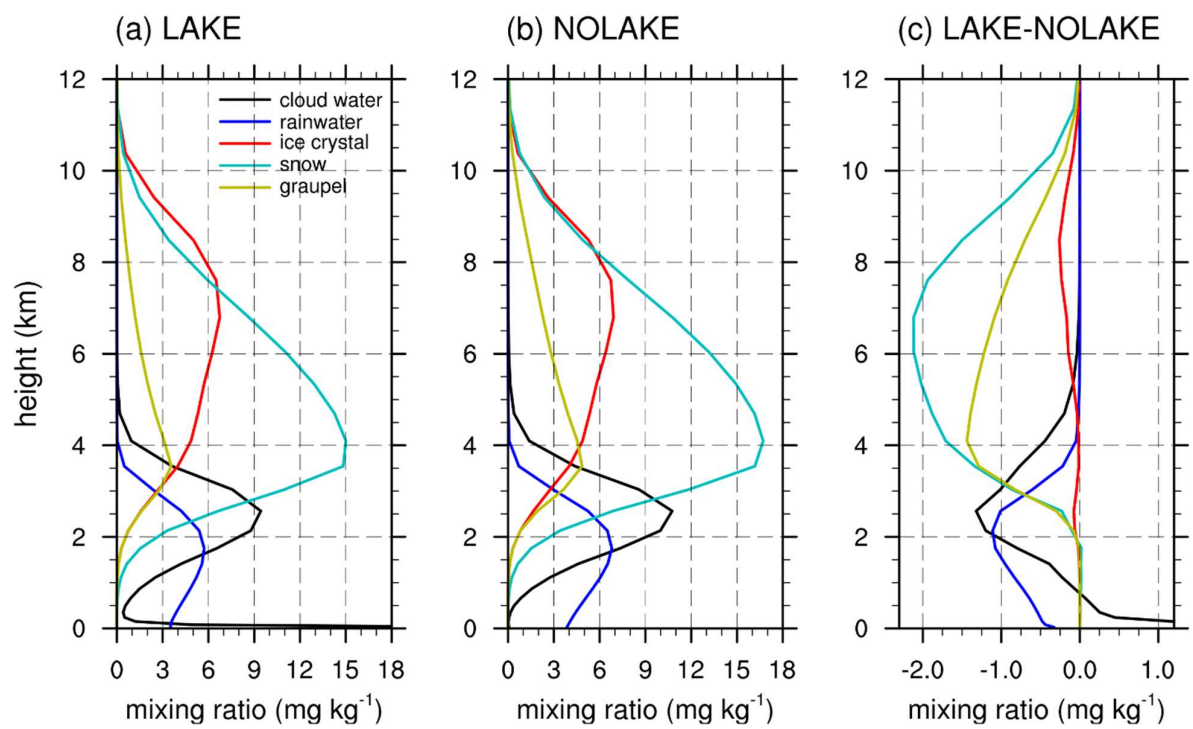
Хоёр симуляцид гадаргын хур тунадасны хоногийн өөрчлөлт нь өглөөний цагаар буурч, үд дундын үед хамгийн багадаа хүрч, улмаар хэсэг хугацаанд нэмэгддэг нийтлэг шинж чанарыг харуулж байна (Зураг 12c). NOLAKE симуляцид гадаргын хур тунадасны хэмжээ үдээс хойш мэдэгдэхүйц нэмэгдэж, 15 цагаас шөнө дунд хүртэл өндөр хэвээр байна. Нуурын нөлөөгөөр гадаргын хур тунадасны хэмжээ багасах нь үдээс хойш болон шөнөдөө илүү байгаа нь харагдаж байна. NOLAKE симуляцаас ялгаатай нь LAKE симуляцид хур тунадасны хоногийн дээд хэмжээ үдээс хойш ажиглагдахгүй байна. Байгаль нуур оршдог дунд болон өндөр өргөрөгт том масштабын меридиональ температурын градиенттай холбоотой экстратропик циклонууд хур тунадаст ихээхэн нөлөөлдөг нь мэдэгдэж байгаа боловч Байгаль нуур нь бэсрэг хэмжээндээ хур тунадасны хэмжээг бууруулж, орон нутгийн агаар мандлын термодинамик ба динамик төлөвийг өөрчилж хур тунадасны хэмжээг бууруулдаг нь харагдаж байна.



Зургаг 12. Байгаль нуурын талбайн гадарга дээрх доош чиглэсэн богино долгионы цацрагийг LAKE (тасралтгүй шугам) болон NOLAKE (тасархай шугам) симуляцид дунджаар авсан (a) гадаргуугийн мэдрэг дулааны урсгал, (b) гадаргын дулааны далд урсгал, (c) гадаргын хур тунадасны хэмжээ, (d) нийт (шингэн болон мөс) үүлний ус, (e) тунадасжих ус (босоо баганаар нэгтгэсэн усны уурын хэмжээ)-ны хоногийн хугацааны явц. (f) дахь улаан цул шугам нь LAKE болон NOLAKE симуляцийн (LAKE–NOLAKE) хоорондын ялгаа

Тунадасны бүх хэлбэрийн холимгийн харьцааны босоо профайлаас харахад LAKE болон NOLAKE симуляцийн аль алинд нь цасны хольцын харьцаа их байгаа нь харагдаж байна (Зураг 13). Нуур байгаа нь атмосферийн доод давхарга дахь үүлний уснаас бусад төрлүүдийн хольцооны харьцааг ерөнхийд нь бууруулахад хүргэдэг. Цас хольцооны харьцаа болон graupel-ын хольцооны харьцаа хоёулаа нуурын нөлөөгөөр багасах нь ойролцоогоор ижил хэмжээтэй байгаа нь хайлалтыг бууруулснаар LAKE симуляцийн гадаргуугийн хур тунадасны хэмжээг бууруулахад хүргэж байна.

Дээр дурдсан нуураас үүдэлтэй өөрчлөлтүүд, тухайлбал, гадарга орчмын хөрөлт, суларсан конвекц, усны уурын хольцооны харьцаа, хур тунадас багассан зэрэг нь харилцан уялдаатай бөгөөд нарны цацрагийн хэмжээ эдгээр өөрчлөлтөд чухал үүрэг гүйцэтгэдэг. Нуурын гадаргын ойролцоох хөрөлтөөс үүссэн суларсан конвекц нь Зураг 12d-д үзүүлсэн шиг усны нийт агууламжийг (өөрөөр хэлбэл шингэн ба мөсөн агууламжийн нийлбэр) багасахад хүргэдэг. Үүлний нийт усны хэмжээ бага байгаа нь LAKE симуляцийн хур тунадасны хэмжээ бага байгаатай шууд холбоотой. Үүлний оптик зузааныг бууруулдаг нийт өтгөрүүлсэн үүлний усны агууламж болон тунадасжих усны аль алиных нь бууралт нь Зураг 12f-д үзүүлсэн шиг доошоо чиглэсэн богино долгионы цацрагийг илүү хүчтэй болгодог. LAKE симуляцийн хоногийн хугацааны доош чиглэсэн богино долгионы цацраг NOLAKE симуляцийнхаас 6.2 Вт/м^2 -ээр их байна. Нуурын нөлөөгөөр суларсан конвекцийн улмаас нуурын мандал дээрх босоо баганы усны уур, конденсацгийн хэмжээ өөрчлөгдөх нь гадаргад ирж буй богино долгионт цацрагийг нэмэгдүүлж нуурын гадаргууг дулаарахад хүргэдэг бөгөөд энэ нь конвекцийн сулралтыг хэсэгчлэн нөхөж чаддаг.

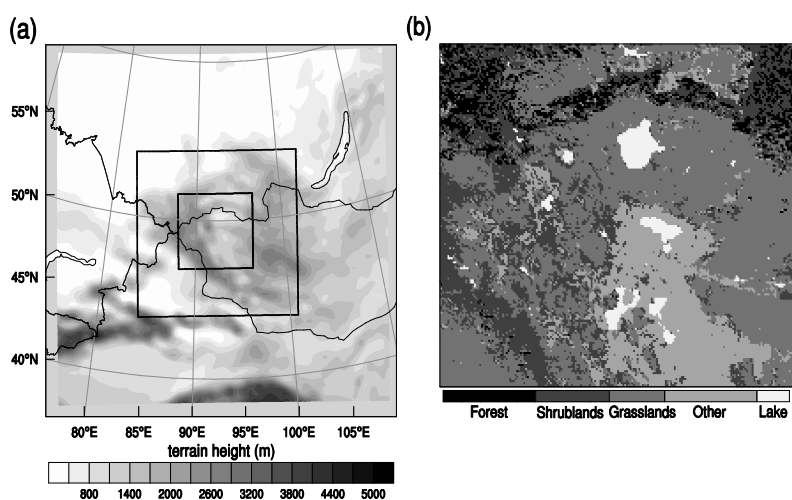


Зураг 13. Байгал нуурын талбайн дунджаар авсан үүлний ус (cloud water), борооны ус (rainwater), мөсөн талст (ice crystal), цас (snow), graupel-ын хольцооны харьцааны (a) LAKE болон (б) NOLAKE симуляци болон (в) LAKE болон NOLAKE симуляци дахь босоо профиль. Босоо координат нь газрын түвшнээс дээш (AGL); нуурын гадаргуу дээрх өндөр нь тэг байна.

3.2 Монгол орны их нууруудын хотгор дахь томоохон нуурууд

Энэ хэсэгт 2.2.1-т дурдсан аргачлалаар Монголын Их Нууруудын хотгорт орших томоохон нууруудын агаар мандалд үзүүлэх нөлөөг тоон загварчлалын аргаар судлав. Монгол орны төв болон баруун хэсгийг оруулсан 3 бүс нутгийг тохируулж хамгийн дотор талын буюу нарийвчлал өндөртэй бүс нутгийг багтаав.

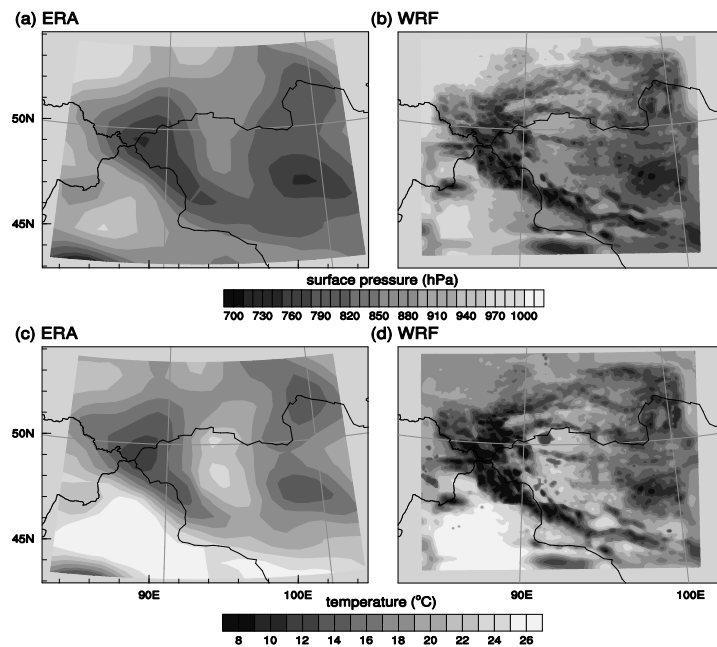
Симуляцийн үр дүнг бататгахын тулд Европын дунд хугацааны прогнозын төвийн $0.75^{\circ} \times 0.75^{\circ}$ нарийвчлалтай ERA-INTERIM реанализ мэдээтэй харьцуулав. 15-р зурагт бодолтын хугацааны 2-р бүс нутгийн газрын гадарга дахь даралт, 2-метрийн төвшний температурыг харьцуулан харуулав. Бүс нутгийн даралт болон температурын тархалтыг харвал уулзүйг дагаж хотгор газар температур их, уулархаг газраар температур бага байх нь харагдаж байна. Реанализ мэдээ болон загварын үр дүнгүүд өөр өөр нарийвчлалтайн улмаас зарим зөрүүтэй байдал харагдах ч орон зайн тархалт ерөнхийдөө адил байна. Эндээс харахад орон зайн нарийвчлал хэдий чинээ сайн байх тусам төдий чинээ нарийвчилсан үр дүн харагдах нь тодорхой байна.



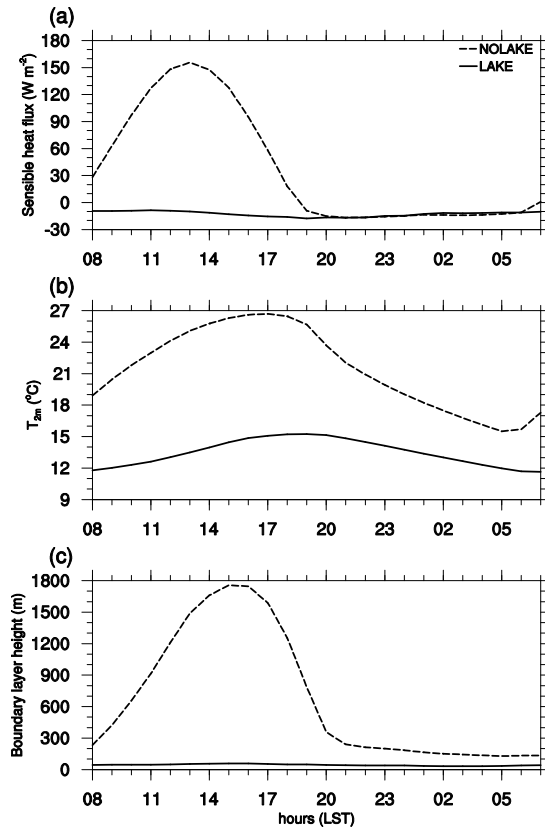
Зураг 14. (a) Тооцооллын бүс нутгийн өндөршил болон (b) 3-р домэйны газар ашиглалт, газрын бүрхэвч. (Цагаан өнгө – нуур)

Монголын Их нууруудын хотгорын Увс, Хар-Ус, Хар, Үүрэг, Дөргөн зэрэг 300 орчим нуурыг багтаасан газрыг хамарна (Зураг 14). 2015 оны зуны улирлаар симуляц явуулж Монголын Их Нуурууд дахь нуурууд цаг агаарын элементүүдэд ямар нөлөө үзүүлэх талаар тооцоолол хийв. Симуляцийн анхдагч болон захын нөхцлөөр АНУ-ын Агаар мандлын үндэсний төвийн 6 цаг тутмын мэдээг ашиглав.

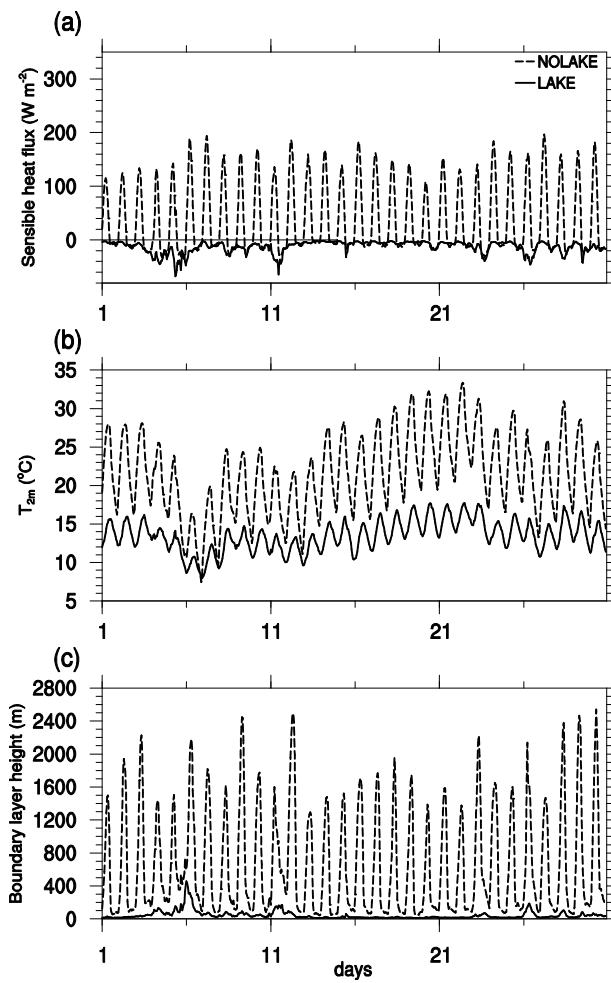
16-р зурагт LAKE, NOLAKE симуляцуудын ил дулааны урсгал, 2-метрийн төвшний агаарын температур, хязгаарын үе давхаргын өндрийн хоногийн явцыг харуулав. Шөнийн хугацаанд LAKE, NOLAKE симуляцуудын ил дулааны урсгал ойролцоо байх ба өдрийн хугацаанд NOLAKE симуляцийн утга нэмэгдэж, харин LAKE симуляцийнх сөрөг утгатай хэвээр байгаа нь агаараас нуурын мандал дулаан авч байгааг илтгэнэ. Өөрөөр хэлбэл ил дулааны урсгал бага байгаагийн улмаас нуурын гадаргын температур нуурын мандал дээрх агаарынхаас бага, хязгаарын үе давхаргын өндөр бага байна. Энэ нь нуурын нөлөөгөөр агаар мандал нуурын гадаргын харилцан үйлчлэл ургамлан бүрхэвч ба агаар мандал хоорондынхоос сул, нуурын дээд хэсгийн агаар илүү тогтвортой байна гэсэн үг. Энэ үр дүн Байгаль нуурын симуляцийн үр дүнтэй таарч байна. LAKE, NOLAKE симуляцуудын агаарын температурын максимум ажиглагдах хугацаа өөр өөр байна. LAKE симуляцид 2-метрийн агаарын температур 18-19 цагт 15.2°C хүрч буй бол NOLAKE симуляцийн максимум 2 цагаар эрт, 26.7°C хүрч байна. LAKE симуляцийн максимум ажиглагдах хугацаа хожуу байгаа нь усны дулаан багтаамж агаарынхаас их байдагтай холбоотой. NOLAKE симуляцид температурын өсөлт хурдан байхад нуурын гадарга хөрөхдөө удаан байна. Харин температурын хоногийн амплитуд NOLAKE симуляцийнхад их байна. Температурын хамгийн их зөрөө үдээс хойш ажиглагдаж, цаашид аажим буурсаар үүрээр 5 цаг орчимд хамгийн бага зөрөөтэй болж байна.



Зураг 15. ERA-INTERIM реанализ болон симуляцийн газрын гадарга дахь даралт, 2-метрийн төвшний агаарын температур



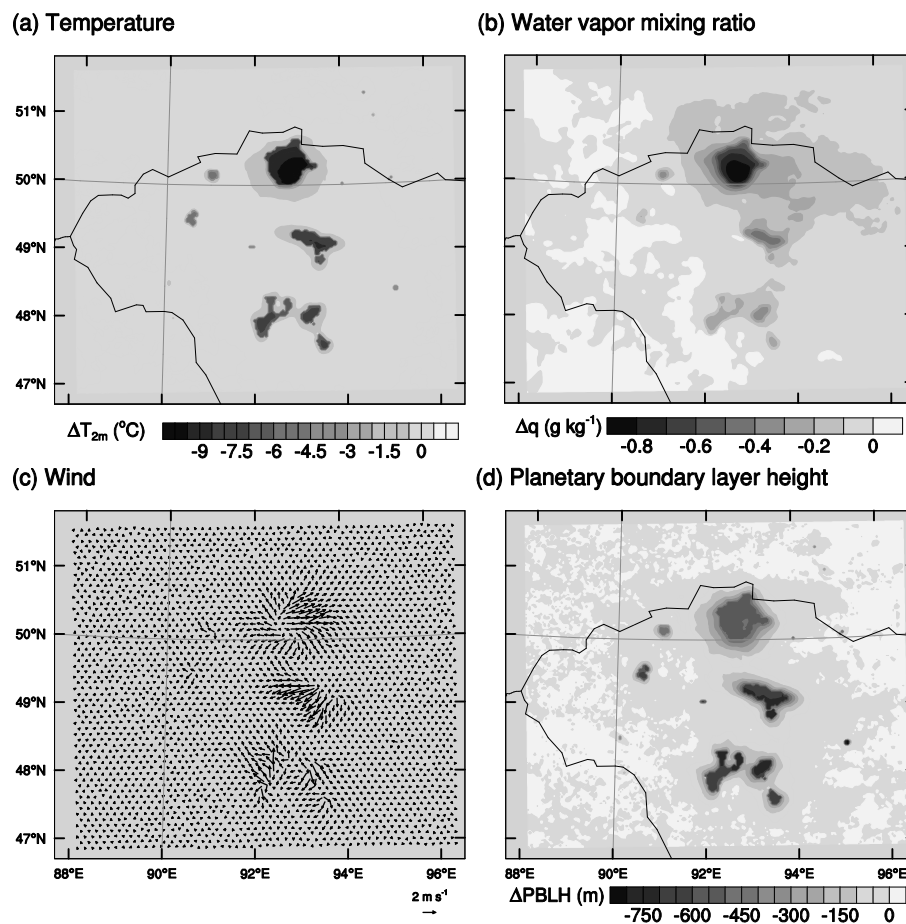
Зураг 16. LAKE, NOLAKE симуляцуудын ил дулааны урсгал, 2-метрийн төвшний агаарын температур, хязгаарын үе давхаргын өндрийн хоногийн явц



Зураг 17. LAKE, NOLAKE симуляцуудын ил дулааны урсгал, 2-метрийн агаарын температур, хязгаарын үе давхаргын сарын хугацааны цуваа

17-р зурагт LAKE, NOLAKE симуляцуудын ил дулааны урсгал, 2-метрийн агаарын температур, хязгаарын үе давхаргын долдугаар сарын хугацааны цувааг харуулж байна. NOLAKE симуляцид газрын гадаргаас агаар мандал руу өгөх ил дулаан өдрийн хугацаанд үргэлж их, шөнийн хугацаанд LAKE симуляцийнхтай ойролцоо байх нь харагдана. LAKE симуляцийн ил дулааны урсгал сөрөг утгатай байгаа нь нуурын мандал мандлаас дээшээ байх агаараас хүйтэн байгааг илтгэнэ. Нуурын мандлаас дээш 2-метрийн төвшний агаарын температурын хоногийн амплитуд нуургүй симуляцийнхаас бага байна. NOLAKE симуляцид хязгаарын үе давхаргын өндөр LAKE симуляцийнхаас үргэлж их, өдрийн хугацаанд заримдаа 1.8 км хүртэл өндөр байгаа нь салхины босоо байгуулагчийн хурд их, конвекцийн хөдөлгөөн ихтэй болохыг илтгэнэ. Сарын хугацаанд хоёр симуляцийн цаг агаарын элементүүдийн тренд адил байх ч амплитуд өдөр өдрөөр харилцан адилгүй харагдаж байгаа нь тухайн өдрүүдийн синоптик процесстой холбоотой ба өөр өөр газрын гадарга агаар мандалтай өөр өөрөөр харилцан үйлчлэлцэхийг илтгэж байна. Зарим сэрүүн өдрүүдэд 2 симуляцийн температурын амплитуд бага, утгууд хоорондоо дөхөж байхад зарим өдрүүдэд температурын ялгаа их, ялангуяа NOLAKE симуляцийн температурын амплитуд их байгаа нь харагдаж байна. Сарын турш LAKE симуляцийн температурын дээд утга 20°C-ээс ихгүй байхад NOLAKE симуляцийн температур 33°C хүрч байна. 2 симуляцийн температурын хамгийн их ялгаа 15.9°C хүрч байна.

18-р зурагт 2-метрийн төвшний агаарын температур, газрын гадаргаас дээш 100 метрээр дундажласан усны уурын хольц, салхи, хязгаарын үе давхаргын өндрийн LAKE, NOLAKE симуляцуудын зөрөөний орон зайн тархацыг харуулж байна. Бодолтын хугацаанд нуурын мандалд болон нуурын орчимд эргэн тойрны газар нутгаас дунджаар 8.7°C хүйтэн, нуурын мөр тодорхой харагдана. Зуны хугацаанд Их нууруудын хотгорт нууруудын улмаас эргэн тойрны орчин сэрүүсдэг нь харагдаж байна. Усны уурын хольцын зөрүү 0.9 г/кг хүрэх ба 200 км хүртэлх газар нутаг зөрүү ажиглагдаж байна. Нуур нь хязгаарын үе давхаргын өндрийг 564 метр хүртэл бууруулж, нуураас гадагш чиглэлтэй салхи буюу дивергенц хөдөлгөөнийг нөхцөлдүүлж байна. Томоохон нууруудаас гадагш чиглэлтэй салхи тод харагдаж, харин жижиг нууруудын ойролцоо температур, усны уурын хольцын зөрүү харагдаж буй ч салхины



Зураг 18. 2-метрийн төвшний агаарын температур, газрын гадаргаас дээш 100 метр баганаар дундажласан усны уурын хольц, салхи, хязгаарын үе давхаргын өндрийн LAKE, NOLAKE симуляцуудын зөрөөний орон зайн тархац.

зөрүү төдийлөн харагдахгүй байгаа нь симуляцын хэвтээ чиглэлийн гридийн алхамтай холбоотой ба тухайн жижиг нууруудыг агуулсан жижиг мужаар симуляц гүйцэтгэвэл зөрүү тод харагдах болно. Эдгээр өөрчлөлтүүд нь Америкийн Их Нууруудын агаар мандалд үзүүлэх нөлөөтэй чанарын хувьд төстэй байна (Notaro et al. 2013). Энэ ажил өгүүлэл болон хэвлэгдсэн ба симуляцийн хугацааг уртасган тооцоолол гүйцэтгэж, орон нутгийн агаарын циркуляцийг цаашид нарийвчлан судлах ажил үргэлжилж байгаа.

Тус судалгааны ажлын энэхүү хэсэгт Увс нуурын цаг уурын элементүүдэд үзүүлэх нөлөөг зуны хугацаагаар туршсан бол цаашид өвлийн хугацааны ямар нөлөө үзүүлэхийг тоон загварчлалын аргаар тооцоолох шаардлагатай. Зуны хугацаанд нуурын цаг агаарт нөлөөлөх нөлөө адилавар шинж чанартай хэдий ч өвлийн хугацаанд ойролцоо өргөрөгт орших эх газрын томоохон нууруудаас шинж чанар өөр байж болзошгүй. Тухайлбал, Америкийн Их Нуурууд өвлийн улиралд ойролцоох газар нутгаас дулаан гадаргатай байдгаас lake effect snow гэж нэрлэгдэх бэсрэг цаг агаарын үзэгдлийг бий болгодог. Түүнчлэн Их Нууруудын газар нутагт өвлийн хугацаанд томоохон газар нутгийг хамардаг Сибирийн их даралтын орны төв тогтвортой байрладаг, агаарын доод давхарга маш эрчимтэй инверсийн давхаргатай, агаар мандал маш тогтвортой байдаг онцлогтой. Иймээс томоохон хэмжээний нуурууд Сибирийн их даралтын оронд хэрхэн нөлөөлдөг талаар судлах нь сонирхолтой ажил болно.

ЕРӨНХИЙ ДҮГНЭЛТ, ЗӨВЛӨМЖ

Төслийн хүрээнд Зүүн Азийн уулархаг бүс нутгийн томоохон усан сангуудыг мезо масштабын агаар мандлын үзэгдлийн эх үүсвэр, тэр дундаа аюултай үзэгдлийн эх үүсвэр болгон авч үзэж, тоон загварчлалын аргаар туршилт хийн судлах явдал байв. Энэ зорилгоор тухайн бүс нутгуудад анх удаа ажиглалтын боломжит бүх өгөгдөл (хиймэл дагуулын мэдээлэл, ре-анализ, цаг уурын ажиглалтын мэдээлэл, мезо масштабын загварчлал)-ийг ашигласан.

WRF загварыг анх удаа нуурын мөсний горим, усны давсжилтын мөсний бүрхэвч, дулааны нөхцөлд үзүүлэх нөлөөг харгалзан үзсэн нуурын загвартай холбож, уулархаг газрын онцлог шинж чанартай Зүүн хойд Азийн бүс нутаг дах томоохон нууруудын бүсэд тохируулж ашиглав. Увс нуур дээрх нуурын конвекц, түүнтэй холбоотой мезо масштабын хуйлраа, конвектив үзэгдлийн шинжилгээ, загварчлалыг хийж гүйцэтгэв.

WRF загварын симуляцийн үр дүн нь хиймэл дагуулын зургийг ашиглан хангалттай дөхүү байгаа нь батлагдсан. Загварчлалын үр дүнд анализ хийж олон улсын хуралд хэлэлцүүлж, WoS/Scopus санд бүртгэлтэй сэтгүүлд бэлтгэж хэвлүүлсэн. Цаашид тоон загварын тухайн бүс нутагт тохируулсан тохиргоог ашиглан уулархаг газар дахь бүс нутгийн загварчлалд ашиглах, үр дүнг цаашдын гүнзгийрүүлсэн судалгаанд хэрэглэх, бүс нутгийн симуляц, агаар мандлын мезо масштабын процесс, тоон загвар зэрэг хичээлүүдэд хэрэглэх боломжтой.

Тоон загварын тухайн бүс нутагт тохируулсан тохиргоог ашиглан уулархаг газар дахь бүс нутгийн загварчлалд ашиглахыг зөвлөж байна. Энэхүү судалгаа нь нуур-агаар мандлын харилцан үйлчлэлийг тоон загварын аргаар судлах томоохон ажлын эхлэл ба цаашид бүс нутгийн мезо масштабын процессийн талаар судалгаа хийхэд дараах зөвлөмж хүргүүлж байна. Үүнд:

- Хиймэл дагуулын мэдээлэл, ре-анализ мэдээ, мезо масштабын загварчлалын үр дүнг ашиглан уулархаг газрын томоохон нууруудын мезо масштабын конвектив хуйлраа үүсэх нөхцөл, динамикийн судалгааг хийх. Хүчтэй салхи, конвектив хур тунадас үүсэх магадлалын дүн шинжилгээ, эдгээр үзэгдлийн талаархи статистик мэдээллийг бий болгох.
- Хиймэл дагуулын мэдээ, ре-анализ мэдээ, мезо масштабын загварчлалын үр дүнг ашиглан уулархаг бүс нутаг дах томоохон усан сан бүхий газрын агаарын циркуляцийг судлах: бриз салхи ба катабат урсгал, улирлын динамик, хүчтэй салхины давтамжийг судлах.
- Давсархаг нуурын дулааны горим, нуурын мөсний горимд үзүүлэх давсжилтын нөлөөлөл, түүний агаар мандалтай харилцан үйлчлэлийг судлахын тулд тус судалгаанд ашигласан мезо масштабын загварчлалыг ашиглах боломжтой.
- Хиймэл дагуулын мэдээ, ре-анализ мэдээ, мезо масштабын загварчлалын үр дүнг ашиглан хиймэл усны томоохон байгууламж бүхий бүс нутагт мезо масштабын үзэгдлийн нөхцөл, хөгжлийн динамикийг судлах. Салхины эрс тэс горим, хэт хур тунадас орох магадлалын үнэлгээг тоон загвар болон бусад арга зүй, мэдээллийг ашиглан хийх боломжтой

IV Бүлэг Судалгааны үр дүнг эрдэм шинжилгээний хурал, бүтээлд хэвлүүлсэн байдал

1. Импакт фактор $IF=4.720$ *Geophysical Research Letters* эрдэм шинжилгээний сэтгүүлд өгүүлэл хэвлүүлэхээр мэдүүлсэн.

manuscript submitted to *Geophysical Research Letters*

1

Effects of Lake Baikal on Summertime Precipitation Climatology over the Lake Surface

2

3

4

5

6

Hyunho Lee¹, Gantuya Ganbat², Han-Gyul Jin³, Jaemyeong Mango Seo⁴,
Sungju Moon³, Hyejeong Bok⁵, and Jong-Jin Baik³

7

8 ¹ Department of Atmospheric Science, Kongju National University, Gongju, South Korea

9 ² Faculty of Engineering, German-Mongolian Institute for Resources and Technology,

10 Ulaanbaatar, Mongolia

11 ³ School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul, South Korea

12 ⁴ Max-Planck Institute for Meteorology, Hamburg, Germany

13 ⁵ National Air Emission Inventory and Research Center, Ministry of Environment,

14 Cheongju, South Korea

15

16 Corresponding authors: Jong-Jin Baik (jjbaik@snu.ac.kr) and Gantuya Ganbat

17 (gantuya@gmit.edu.mn)

18

19 Key Points:

20

21

22

23

24

25

26

- We conducted two 15-yr cloud-resolving simulations to investigate how Lake Baikal affects summertime surface precipitation over it
- A decrease in air temperature weakens convection over the lake, reducing precipitation by 13% as well as water vapor amount
- It is essential to consider complex interactions among clouds, radiation, and lake surfaces to characterize the lake effects

2. ОХУ-ын Эрхүү хотод 2021 оны 6 дугаар сарын 14-17-нд болсон “Климатические риски и космическая погода” олон улсын хуралд илтгэл:
Gantuuya Ganbat, Ganbat Danaa “Lake-atmosphere Interactions in the Mongolian Great Lakes and the Baikal Lake”



3. ISBN 978-5-9624-1956-5 дугаартай “Климатические риски и космическая погода” олон улсын хурлын эмхэтгэлд өгүүлэл
https://drive.google.com/file/d/1gTW8xE_Xvued_-y1A12liTyLdzrmpfMv/view



Сверкунова Т. А., Вологжина С. Ж., Латышева И. В., Лощенко К. А. Современные особенности струйных течений над районами аэродрома Иркутск	200
Синюкович В. Н., Латышева И. В., Макухин В. Л. Климатические риски дождевых паводков на притоках Южного Байкала	207
Фролов Д. М. Современные климатические риски	215
РАЗДЕЛ 4. ФИЗИКА И ДИНАМИКА АТМОСФЕРЫ. ПРОЦЕССЫ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВЕРХНЕЙ, СРЕДНЕЙ И НИЖНЕЙ АТМОСФЕРЫ / SECTION 5. PHYSICS AND DYNAMICS OF THE ATMOSPHERE. PROCESSES AND INTERACTION OF THE UPPER, MIDDLE AND LOWER ATMOSPHERES	
Badamkhand Tserennadmid, Jambajamts Lkhamjav. A Statistical Analysis of Food Near the Buyant-Ukhaa Airport	220
Ganbold Boldbaatar, Jambajamts Lkhamjav. Numerical Simulation for Thunderstorm Cases over the Ulaanbaatar Area	228
Gantuya Ganbat, Ganbat Danaa. Lake-atmosphere Interactions in the Mongolian Great Lakes and the Baikal Lake	234
Алексеева Е. Г., Анискина О. Г. Влияние циркуляции атмосферы на экстремальную температуру воздуха на Северо-Западе России	238
Васильев М. С. Динамика высоты тропопаузы над Центральной Яку- тией по данным радиозондирования атмосферы в 2020 г.	243
Данильчук Е. И., Демьянов В. В. Оценка частоты девиации в спек- тре мерцаний фазы с помощью аналитической модели	247
Диденко К. А., Погорельцев А. И. Применение непрерывного вейвлет преобразования для изучения планетарных волн	254
Домбровская Н. С., Мордвинов В. И., Зокальцева О. С. Вертикаль- ная структура низкочастотных колебаний стратомезосферы	261
Исмагилов Н. В., Тиглева А. И., Николаев А. А. Сезонные пере- стройки циркуляции в стратосфере Северного полушария	270
Курдяева Ю. А., Кшевещкий С. П. Исследование распространения атмосферных волн от локальных тропосферных источников в верхнюю ат- мосферу с учетом фонового ветра	275
Молчанова Н.О., Полетаев А. С., Васильев Р. В., Ченский А. Г. Об- зор атмосферных эффектов, связанных с грозовыми разрядами	281
Николашкин С. В., Колтовской И. И., Парников С. Г., Титов С. В. Регистрация усиления красной эмиссии атомарного кислорода в свечении ночного неба во время запуска тяжелой ракеты с космодрома «Восточный»	287
Переведенцев Ю. П., Шерстюков Б. Г., Шанталинский К. М., Мирсаева Н. А., Аухадеев Т. Р., Мягков М. А., Парубова Е. М. Изменения температуры воздуха и атмосферных осадков на территории России в XX– XXI веках	292

Lake-Atmosphere Interactions in the Mongolian Great Lakes and the Baikal Lake

Gantuya Ganbat (gantuya@gmit.edu.mn)¹, Ganbat Danaa²

¹German-Mongolian Institute for Research and Technology, Ulaanbaatar, Mongolia

²Mongolian University of Science and Technology, Ulaanbaatar, Mongolia

Abstract/ Lakes influence the regional atmosphere through modifying thermodynamic characteristics. This study examines the effects of lakes in the Mongolian Great Lakes region and the Baikal lake on summertime meteorological parameters using the Weather Research and Forecasting (WRF) model. Diurnal variations in the lakes' impact on the atmosphere are found through changing the surface energy budget, which includes changes in sensible and latent heat fluxes. The changes in heat fluxes cause relatively lower surface temperature which leads to a shallow boundary layer over the lake surfaces. Greater heat capacity in water bodies compared to grasslands causes slower heating and cooling rates in the lakes. The amplitude of air temperature over the lake surfaces is smaller than that over the grasslands. Lakes promote diverging winds near the ground, furthermore, tend to stabilize the overlying atmosphere in the summertime.

Keywords: lake; atmosphere; interaction; Mongolian Great Lakes; numerical simulation;

Introduction

One of the important factors determining the regional climate is the presence of the lakes. Interactions between the lake and atmosphere through exchanging heat, water vapor, and momentum fluxes [1] define the regional climate and weather. Atmospheric circulations in the surrounding region are affected by lakes through differences in thermal and frictional properties between lake and land surfaces [2].

Numerous numerical studies focused on lake-atmosphere interactions. Notaro et al. [3] studied the impacts of the Laurentian Great Lakes on regional climate by conducting numerical simulations with and without lakes and presented the decreased (increased) sea-level pressure in autumn-winter (summer), weakened cold-season cyclones and increased (decreased) turbulent fluxes during the cold (warm) season due to the presence of the lakes. Thiery et al. [4] have conducted simulations using the Weather Research and Forecasting (WRF) model to investigate the effects of African Great Lakes on regional climate and revealed that the daytime cooling by lakes modifies the dynamics and stability of the regional atmospheric condition.

Satellite data shows the reduced precipitation on and surrounding lakes (e. g., Baikal lake) in the summertime (Figs. 1, 2). Dynamic interactions between lakes and atmosphere should be conducted in order to explain the importance of the lakes in atmospheric circulations through assessing the changes in meteorological parameters.

The Mongolian Great Lakes depression region is an important basin generally in semi-arid areas which includes over 300 lakes. The lake-atmosphere interactions in the Great Lakes depression region are likely to modify the atmospheric boundary layer and there is a lack of its investigation through numerical methods. This study investigates the impacts of lakes in the summertime in the Mongolian Great Lakes region on some meteorological parameters.

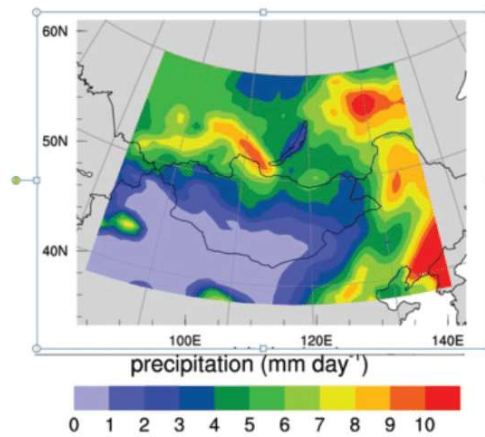


Fig. 1. Precipitation rate in mm/day over Mongolia and its surrounding region constructed from the ERA-Interim

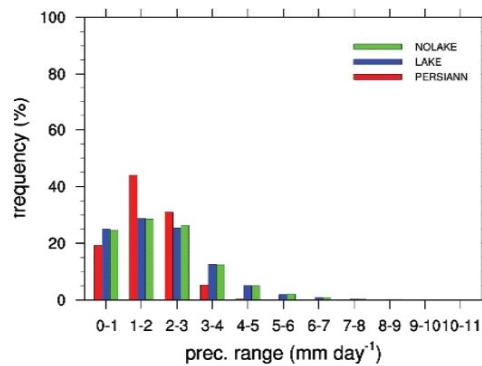


Fig. 2. Precipitation rate constructed from the PERSIANN data

Data and Methods

The lakes-atmosphere interactions in the Mongolian Great Lakes depression region are investigated using the WRF model version 3.6.1 [5]. The numerical simulations are set up with three domains with 100×90 , 145×127 , and 202×172 grid points and horizontal grid spacing of 27, 9, and 3 km, respectively. The Great Lakes depression region is situated in the innermost domain (Fig. 3). The initial and boundary conditions are taken from National Center for Environmental Prediction (NCEP) reanalysis data. The simulation results for the one-month summer period are used for the analysis.

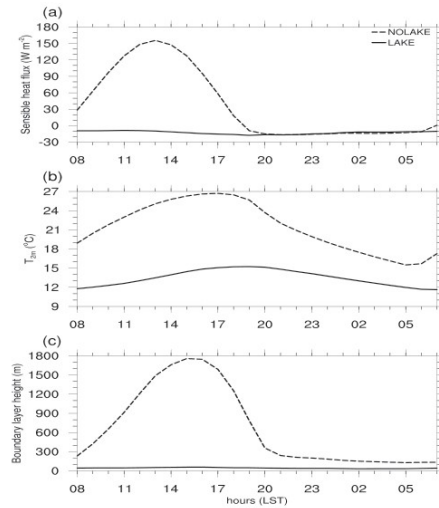


Fig. 3. Daily variations of (a) sensible heat flux, (b) temperature at 2 m, and (c) boundary layer height averaged over the lake areas in the LAKE and NOLAKE simulations

The lake-atmosphere interactions and impacts of the lake on regional weather are tested comparing two simulations – the original case (“LAKE” experiment) and the case without lakes in the Great Lakes region (“NOLAKE” experiment). The performance of the model simulation is assessed by comparing LAKE simulation results to ERA-Interim products for temperature and sea-level pressure with a horizontal resolution of $0.75 \times 0.75^\circ$.

Results and Discussions

The daily variations of sensible heat flux, temperature at 2 m, and boundary layer height averaged over the lakes in the Great Lakes basin in the LAKE and NOLAKE simulations are shown in fig. 4. The sensible heat flux in the NOLAKE simulation is greater than that in the LAKE simulation which is in agreement with Notaro et al. [3]. The grassland surfaces in the NOLAKE simulation heat up faster than the lake surface, where the heat is absorbed by a thick mixed layer, which in turn leads to the cooler lakes’ surface. In the NOLAKE simulation, the greater sensible heat fluxes over the grassland surfaces result in the greater temperature at 2 m compared to the LAKE simulation. Grasslands in the NOLAKE simulation reach the maximum of $\sim 26.7^\circ\text{C}$ while the lakes in the LAKE simulation reach the maximum of $\sim 15.2^\circ\text{C}$. Moreover, larger temperature amplitude is found in the grassland surfaces than the lake surfaces highlighting the absorption of heat by water. The boundary layer over the grasslands in the NOLAKE simulations is convective during the daytime, in contrast, the cool lakes in the LAKE simulation stabilize the overlying atmosphere. The boundary layer height varies diurnally reaching ~ 663 m in average in the NOLAKE simulation while it is nearly steady in the LAKE simulation.

Figure 4 shows the mean difference in temperature at 2 m, water vapor mixing ratio vertically averaged within lowest ~100 m layer above the surface, wind fields, and boundary layer height between the LAKE and NOLAKE simulations to explore the horizontal characteristics of the impacts of lakes on meteorological parameters. The lakes are significantly cooler with an average difference of ~8.7°C. Reduced water vapor mixing ratio over the lakes in the LAKE simulation is accompanied by suppressed evaporation from the cool water surfaces which is partly in agreement with the results by Notaro et al. [3]. The reduced precipitation and evaporation are caused by the Great Lakes in the summertime. The area with reduced water vapor is seen as far as ~200 km away from the lakes. Winds are diverged due to the presence of the lakes. Thinned boundary layer height over the lakes is associated with reduced sensible heat flux, cooler air over the lakes. These features resemble those found in the Laurentian Great Lakes, USA [3].

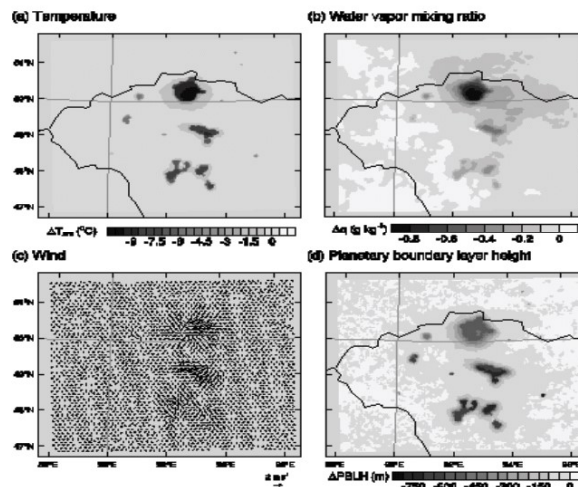


Fig. 4. Differences in (a) temperature at 2 m, (b) water vapor mixing ratio within ~100 m layer above the surface, (c) wind speed, and (d) planetary boundary layer height between the LAKE and NOLAKE simulations

References

1. Kourzeneva E. V., Samuelsson P., Ganbat G., Mironov D. Implementation of lake model Flake into HIRLAM. *HIRLAM newsletter*, 2008, vol. 54, pp. 54–61.
2. Mukabana J. R., Pielke R. A. Investigating the influence of synoptic scale winds and mesoscale circulations and diurnal weather patterns over Kenya using a mesoscale numerical model. *Monthly Wea Rev.*, 1996, vol. 124, pp. 224–243.
3. Notaro B., Holman K., Zarrin A., Fluck E., Vavrus S., Bennington V. Influence of the Laurentian Great Lakes on regional climate. *J. of Clim.*, 2015, vol. 26, pp. 789–804.
4. Thiery W., Davin E. L., Panitz H. J., Demuzere M., Lhermitt S., van Lipzig N. Impacts of the African Great Lakes on the regional climate. *J. Clim.*, 2015, vol. 28, pp. 4061–4085.
5. Skamarock W. C., Klemp J. B., Dudhia J., Gill D. O., Barker D. M., Duda M. G., Huang X. Y., Wang W., Powers J. G. *A description of the advanced research WRF version 3*. NCAR, Boulder.

4. ОХУ-ын талаас хамтарсан Москвагийн Их Сургуулийн судлаач И.А. Репина, А.А. Шестакова нар өгүүлэл хэвлүүлсэн.
 Shestakova, A.A., Repina, I.A. (2021) Mesoscale vortex over Lake Baikal: A case-study Russian Journal of Earth Sciences. 21: ES5001. <http://rjes.wdcb.ru/v21/2021ES000763/2021ES000763.pdf>

RUSSIAN JOURNAL OF EARTH SCIENCES, VOL. 21, ES5001, doi:10.2205/2021ES000763, 2021

Mesoscale vortex over Lake Baikal: A case-study

A. A. Shestakova¹ and Repina, I. A.¹

Received 16 March 2021; accepted 1 April 2021; published 11 September 2021.

This paper presents the results of a case-study of lake-effect circulation over Lake Baikal in December 2012, when the lake surface was still almost free from ice. The most spectacular manifestation of lake effect was a mesoscale vortex over the northern part of the lake. The analysis of this phenomenon is based on satellite observations, in-situ measurements, as well as on mesoscale numerical modeling with the WRF-ARW model. The model reproduced well the time and location of the vortex observed, correctly featuring cloud structures and time course of meteorological parameters near the surface, though it was less accurate reproducing precipitation due to some space shift between observed and simulated landfall location. Sensitivity experiments revealed the role of the warm lake surface and orography in the vortex generation and intensification. Unlike vortices over the American Great Lakes, where orography is small and the main reasons of vortex formation are breeze circulation and diabatic heat fluxes from the surface, considered Baikal vortex was formed primarily due to orography-induced convergence. Orography generated conducive conditions for local winds and breeze circulation and to a large extent formed unstable temperature stratification due to partial blocking of the incoming flow. **KEYWORDS:** Mesoscale vortex; lake-effect precipitation; WRF-ARW; vorticity.

Citation: Shestakova, A. A. and Repina I. A. (2021), Mesoscale vortex over Lake Baikal: A case-study, *Russ. J. Earth. Sci.*, 21, ES5001, doi:10.2205/2021ES000763.

1. Introduction

Many different forms of organized convective clouds can be seen from space over the ice-free lakes during the cold season – separate convective clouds, roll convection, shoreline bands and finally mesoscale vortices (or mesocyclones) [Laird and Kristovich, 2004]. Such phenomena are described in detail over the American Great Lakes [Forbes and Merritt, 1984; Laird, 1999; Laird and Kristovich, 2004; Pease et al., 1988]. In Russia, such phenomena are expected over large lakes (Onega and Ladoga Lakes, Lake Baikal), which, due to their size and depth, are not covered with ice in the beginning of winter. Wintertime lake-effect precip-

¹A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

Copyright 2021 by the Geophysical Center RAS. <http://rjes.wdcb.ru/doi/2021ES000763-res.html>

itation are common on the southern coast of the Caspian Sea [Ghafarian et al., 2017; Khoshakhlagh et al., 2016; Shestakova and Toropov, 2021].

From a scientific and practical point of view, the most interesting circulations are mesoscale vortices, which may be associated with heavy precipitation [Pease et al., 1988]. The mechanisms of formation of such lake vortices are usually similar to those for polar lows and tropical cyclones. Generation and intensification of any vortex can be considered from the point of view of the vorticity equation:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\zeta + f)}{\partial t} &= -\bar{v}\nabla(\zeta + f) - \\ w \frac{\partial(\zeta + f)}{\partial z} &- \nabla\bar{v}(\zeta + f) - \\ \left(\frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial z}\right) &+ \frac{1}{\rho^2} \nabla p \nabla \rho \end{aligned} \quad (1)$$

where ζ – vertical component of relative vorticity, f – Coriolis parameter, \bar{v} – horizontal wind vec-

cyclone over Lake Baikal in December 2012 were considered mostly based on numerical modeling using the WRF-ARW model.

Mesoscale vortex with a diameter of about 60 km, corresponding to meso- β scale, occurred over the northern half of Lake Baikal under the influence of two factors, that are heat and moisture fluxes from the ice-free lake surface (lake effect) and orography. Numerical experiments showed that, in the absence of at least one of these factors, the mesocyclone is not formed. In the experiment with ERA5 reanalysis used as initial and boundary conditions, the northern half of the lake was covered with ice (due to incorrect ice in ERA5 for this case) and convection was suppressed. However, although this experiment was very different from observations, weak near-surface vortices in the northern part of the lake were still formed, which indicates the important role of orography in this process.

Development of this mesocyclone can be described as follows. Orography around the lake creates a flow convergence over the lake due to the convergence of orographic flows characteristic of Lake Baikal, as well as due to the fact that the breeze circulation is not disturbed by the background flow due to the partial flow blocking by mountains. As a result, an area of low pressure and upward motions is formed over the lake. Thus, this vortex originated from the so-called shear vortex (due to horizontal wind shear), and therefore the vortex was barotropic. At the same time, the intensification of upward motions in the vortex is possible due to unstable temperature stratification, which is largely formed under the influence of orography (due to blocking of the incoming flow by mountains), as well as due to local mesoscale advection of air heated by turbulent heat exchange with the lake surface in the lower layer, and also due to an increase in the downward long-wave radiation under the clouds and the release of condensation heat in the clouds.

The values of the convective available potential energy in our case were rather small; therefore, the cloudiness outside the vortex had a small vertical scale and the amount of precipitation was small. Inside the vortex, where, according to simulations, the snowfall intensity reached 20 mm/3 h, the growth of deep convection was caused by forced upward motions due to flow convergence. This means that one should not expect heavy precipi-

tation associated with the lake-effect clouds over Lake Baikal under conditions similar to those considered here, unless a mesocyclone or at least a convergence zone has formed.

Although we are studying only one case, this case is typical for this time of year. Indeed, westerly and northwesterly winds prevail over Lake Baikal at the beginning of winter at altitudes above 850-hPa level. Due to the great temperature difference between the unfrozen lake and the cold land, a monsoon (or breeze) circulation used to form, which contributes to the development of local winds. Therefore, the greatest frequency of strong local winds occurs from October to December [*Savinova, 1977*], before the lake surface is covered with ice. The high frequency of local circulations of the northwestern type according to [*Savinova, 1977*] creates prerequisites for a high frequency of vortex in the northern half of Lake Baikal (in the area of Svyatoj Nos Peninsula) at this time of the year. Additional studies of lake vortices frequency over Baikal from satellite data and simulations are required to confirm these speculations.

Finally, we would like to emphasize the practical conclusion drawn from the results of this work. The WRF-ARW model can be recommended for regional forecasting of mesoscale circulations over Lake Baikal. Meteorological parameters at the stations and cloud features are reproduced quite accurately in the control experiment. The time and place of mesocyclone appearance in the model generally coincides with the observed ones, although some space shift of the cyclone landfall in the model led to an inaccurate reproduction of the amount of precipitation. The spatial resolution of the model must be high, at least 5 km [*Naydenov, 2015*], in order to reproduce all orographic flows, since the vortex is very sensitive to orography. The lake surface temperature in the initial data is also a key parameter, since the inadequacy of the LST leads to a complete failure in the precipitation forecast (Figure 6).

Acknowledgements. Authors are grateful to Alexander V. Gavrikov for help in the model configuring and provided computer resources, and also to Pavel A. Toropov for helpful discussions. The work is funded by Russian Foundation for Basic Research, grant # 19-55-44028.

5. Дараахь өгүүллүүдийн талархал хэсэгт тус төслийн санхүүжилтийг дурдаж, талархлын үг орсон.

Ganbat, G., Soyol-Erdene, T.O. and Jadamba, B. (2020). Recent Improvement in Particulate Matter (PM) Pollution in Ulaanbaatar, Mongolia. *Aerosol Air Qual. Res.* 20: 2280–2288. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2020.04.0170>

Aerosol and Air Quality Research, 20: 2280–2288, 2020
ISSN: 1680-8584 print / 2071-1409 online
Publisher: Taiwan Association for Aerosol Research
<https://doi.org/10.4209/aaqr.2020.04.0170>



Technical Note

Recent Improvement in Particulate Matter (PM) Pollution in Ulaanbaatar, Mongolia

Gantuva Ganbat¹, Tseren-Ochir Soyol-Erdene^{2*}, Batbayar Jadamba³

¹ National Committee on Reducing Environmental Pollution, Ministry of Environment and Tourism, Ulaanbaatar 15160, Mongolia

² Department of Environmental and Forest Engineering, School of Engineering and Applied Sciences, National University of Mongolia, Ulaanbaatar 14201, Mongolia

³ National Agency for Meteorology and Environmental Monitoring, Ministry of Environment and Tourism, Ulaanbaatar 15160, Mongolia

ABSTRACT

Ulaanbaatar, the capital city of Mongolia, has occasionally been considered the most polluted city in the world. Approximately 46% of the population resides in Ulaanbaatar, and over half of the population living in *ger* (traditional yurt dwelling) areas consumes raw coal, which leads to an increase in ambient air pollutants. The Government of Mongolia took a series of actions to reduce air pollution; one was the ban on the consumption of raw coal beginning on 15 May 2019. In this study, improvement in particulate matter (PM) air quality was shortly studied by assessing the hourly data for the last six years, from January 2014 to February 2020. The analysis exhibited a major improvement in PM concentrations during the 2019–2020 winter in Ulaanbaatar. The average PM concentrations clearly exhibited a decreasing trend in November 2019–February 2020 compared to the previous five years. The maximum PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations were reduced to 46% and 55%, respectively, compared to the mean maximum values of the previous five years. The most prominent occurrence frequency of PM concentrations shifted to a lower concentration range. Although a PM pollution reduction was seen during the 2019–2020 winter, further air quality improvement can be obtained by taking a set of multiple actions with accurate planning management.

Keywords: Particulate matter; Improvement in air quality; Reductions in PM concentrations; Ulaanbaatar; Mongolia.

INTRODUCTION

Ulaanbaatar, the capital city of Mongolia, is situated in a dome valley located at a high altitude of ~1300 m above sea level and is far from any coast. Due to its location, Ulaanbaatar is known as the coldest capital in the World. It is a home of over 1.5 million people which is around 46% of the population (Mongolian Statistical Information Service, 2020). Sixty percent of its population resides in *ger* areas which usually consumes raw coal and wood for heating and cooking purposes in the cold season. Pollutants are emitted from various sources including over 200,000 *ger* households, mainly using small stoves, ~3000 heat-only boilers (HOBs), 4 power plants, over 500 thousand vehicles, and other sources. Based on the analysis of pollutants in PM collected

for 2004–2008 in Ulaanbaatar, coal combustion processes are largely responsible for fine particle air pollution during winter. Major sources of coarse particle air pollution are crustal matter and coal combustion (Davy *et al.*, 2011). In addition to the pollutant emission sources, the weather condition with temperature inversions under the Siberian high-pressure system (Ganbat and Baik, 2016) plays important role in air pollution in winter. Wintertime air pollution in Ulaanbaatar has been widely noted during the past ~15 years (Guttikunda, 2007; Guttikunda *et al.*, 2013; Ganbat and Baik, 2016).

For years, air pollution was a severe problem in winter, reaching values many times higher than the recommendations of the World Health Organization (WHO) guidelines. For instance, during December 2009–February 2010, the mean PM_{2.5} concentration was 171 µg m⁻³, with a maximum 24-h value reaching 766 µg m⁻³ in Ulaanbaatar (Wang *et al.*, 2018) which was 3.4 and 6.8 times higher than the 24-h average national air pollution standard level of PM_{2.5} according to the National Air Quality Standard MNS 4585:2016 of Mongolia (50 µg m⁻³ for the 24-h average) and WHO guideline level

* Corresponding author.
Tel.: +976-77307730(3208); Fax: +976-11315631
E-mail address: soyolerdene@seas.num.edu.mn

PM concentrations in Ulaanbaatar, Mongolia, for January 2014–February 2020. Pronounced seasonal and diurnal patterns were found for PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations. The concentrations were the highest in cold months. Bimodal daily peaks of PM concentrations were observed.

The PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations in the ambient air of Ulaanbaatar during the 2019–2020 winter were different than those of the previous winters. The data obtained from the national air quality monitoring network showed large and significant reductions of 46% and 55% in the maximum PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations in Ulaanbaatar, respectively. It became evident that the number of heavily polluted days was substantially reduced during the 2019–2020 winter compared to the winters of the previous five years.

This study proposes several directions for further research. Pollution source apportionment and emission inventories will hopefully change in accordance with the replacement of raw coal by briquette fuel. The modified emission inventory can be used in future forecasting and modeling works. Studies on relevant benefits from the improvement in air quality are expected to be considered. Additionally, high-resolution spatial variations in air pollution should be investigated to suggest air pollution reduction measures. Although PM concentration levels were reduced as a result of resources, due to an enormous investment of time, and will, but still far exceed international recommendations, and further air quality improvement may occur after taking a set of multiple actions with accurate planning management.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors appreciate two anonymous reviewers for their detailed and helpful comments on the manuscript. This research was performed with the financial support of the National University of Mongolia (P2018-3607), the TWAS foundation (18-164 RG/CHE/AS.G), and the Science Technological Foundation, Mongolia (RUS/2019/14).

REFERENCES

Adame, J.A., Hernandez-Ceballos, M.A., Sorribas, M., Lozano, A. and De la Morena, B.A. (2014). Weekend-weekday effect assessment for O₃, NO_x, CO, and PM₁₀ in Andalusia, Spain (2003-2008). *Aerosol Air Qual. Res.* 14: 1862–1874. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2014.02.0026>

Allen, R.W., Gombojav, E., Barkhasragchaa, B., Tsogtbaatar, B., Lkhasuren, O., Amram, O., Takaro, T.K. and Janes, C.R. (2013). An assessment of air pollution and its attributable mortality in Ulaanbaatar, Mongolia. *Air Qual. Atmos. Health* 6: 137–150. <https://doi.org/10.1007/s11869-011-0154-3>

Davy, P.K., Gunchin G., Markwitz A., Trompeter W.J., Barry, B.J., Shagijamba, D. and Lodoysamba, S. (2011). Air particulate matter pollution in Ulaanbaatar, Mongolia: Determination of composition, source contributions and source locations. *Atmos. Pollut. Res.* 6: 126–137. <https://doi.org/10.5094/APR.2011.017>

Enkhjargal, A. and Burmaajav, B. (2015). Impact of the ambient air PM_{2.5} on cardiovascular diseases of

Ulaanbaatar residents. *Geogr. Environ. Sustainability* 8: 35–41. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2015-8-4-35-41>

Enkhmaa, D., Warburton, N., Javzandulam, B., Uyanga, J., Khishigsuren, Y., Lodoysamba, S., Enkhtur, S. and Warburton, D. (2014). Seasonal ambient air pollution correlates strongly with spontaneous abortion in Mongolia. *BMC Pregnancy Childbirth* 14: 146. <https://doi.org/10.1186/1471-2393-14-146>

Ganbat, G. and Baik, J.J. (2016). Wintertime winds in and around the Ulaanbaatar metropolitan area in the presence of a temperature inversion. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.* 52: 309–325. <https://doi.org/10.1007/s13143-016-0007-y>

Guttikunda, S.K. (2007). *Urban air pollution analysis for Ulaanbaatar, Mongolia*. Consultation report. The World Bank, Washington, DC.

Guttikunda, S.K., Lodoysamba, S., Bulgansaikhan, B. and Dashdondog, B. (2013). Particulate pollution in Ulaanbaatar, Mongolia. *Air Qual. Atmos. Health* 6: 589–601. <https://doi.org/10.1007/s11869-013-0198-7>

Hopke, P.K., Cohen, D.D., Begum, B.A., Biswas, S.K., Ni, B., Pandit, G.G., Santoso, M., Chung, Y.S., Davy, P., Markwitz, A., Waheed, S., Siddique, N., Santos, F.L., Pabroa, P.C.B., Seneviratne, M.C.S., Wimalawattananun, W., Bunprapob, S., Vuong, T.B., Duy Hien, P. and Markowicz, A. (2008). Urban air quality in the Asian region. *Sci. Total Environ.* 404: 103–112. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.05.039>

Kim, J.W., Han, B.S. and Baik, J.J. (2020). Temporal and spatial variations of workday-holiday particulate matter concentration differences in Seoul. *J. Korean Soc. Atmos. Environ.* 36: 25–30. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.1.025>

Kim, Y.L. and Lee, G. (2018). Trend of air quality in Seoul: Policy and science. *Aerosol Air Qual. Res.* 18: 2141–2156. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2018.03.0081>

Lang, J., Zhang, Y., Zhou, Y., Cheng, S., Chen, D., Guo, X., Chen, S., Li, X., Xing, X. and Wang, H. (2017). Trends of PM_{2.5} and Chemical Composition in Beijing, 2000–2015. *Aerosol Air Qual. Res.* 17: 412–425. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2016.07.0307>

Lim, C.C., Thurston, G.D., Shamy, M., Alghamdi, M., Khoder, M., Mohorjy, A.M., Alkhalaf, A.K., Brocato, J., Chen, L.C. and Costa, M. (2018). Temporal variations of fine and coarse particulate matter sources in Jeddah, Saudi Arabia. *J. Air Waste Manage. Assoc.* 68: 123–138. <https://doi.org/10.1080/10962247.2017.1344158>

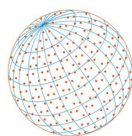
Liu, Z., Hu, B., Wang, L., Wu, F., Gao, W. and Wang, Y. (2014). Seasonal and diurnal variation in particulate matter (PM₁₀ and PM_{2.5}) at an urban site of Beijing: Analyses from a 9-year study. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 22: 627–642. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3347-0>

Mongolian Statistical Information Service (2020). www.1212.mn

National Audit Report (2018). National Audit Report. <https://archive.audit.mn/wp-content/uploads/2018/10/tsewer-agaar-san.pdf>

Wang, M., Kai, K., Sugimoto, N. and Enkhmaa, S. (2018). Meteorological factors affecting winter particulate air

Soyol-Erdene, T.O., Ganbat, G., Baldorj, B. (2021). Urban Air Quality Studies in Mongolia: Pollution Characteristics and Future Research Needs. *Aerosol Air Qual. Res.* 21, 210163. <https://doi.org/10.4209/aaqr.210163>



Aerosol and Air Quality
Research

REVIEW
<https://doi.org/10.4209/aaqr.210163>

Urban Air Quality Studies in Mongolia: Pollution Characteristics and Future Research Needs

Tseren-Ochir Soyol-Erdene^{1,2*}, Gantuya Ganbat³, Barkhasragcha Baldorj⁴

¹Laboratory of Environmental Chemistry and Geochemistry, National University of Mongolia, Ulaanbaatar, Mongolia

²Department of Environmental and Forest Engineering, School of Engineering and Applied Sciences, National University of Mongolia, Ulaanbaatar, Mongolia

³German-Mongolian Institute for Resources and Technology, Nalaikh, Ulaanbaatar, Mongolia

⁴Central Laboratory of Environmental Monitoring, National Agency of Meteorology and Environmental Monitoring, Ulaanbaatar, Mongolia

ABSTRACT

For the last decades, Mongolia has seen an extensive escalation in population growth, urbanization, and industrialization, together with great increase in mining and usage of vehicles. As a result, a substantial increase has taken place in the types and number of emission sources of air pollutants, especially in urban areas. During the cold season, air pollution level in Ulaanbaatar, the capital of Mongolia, is frequently ranked as the highest in the world. However, due to the lack of air quality management, the country is suffering from a deterioration of air quality.

Despite the worse air pollution situation, due to insufficient research capacity of the country, to date, research works on characteristics of air pollution have mainly been based on current capability and/or collaboration with foreign institutes. The research gap in this area necessitates numerous investigations, which could have great importance in developing mitigating strategies and minimizing the adverse impact of air pollution on local and regional scales. This paper reviews previously available studies and reports in international scientific journals on air quality in Mongolia. Based on the existing research works, future needs of studies on ambient air pollution in Mongolia are suggested.

OPEN ACCESS 

Received: July 3, 2021
Revised: September 21, 2021
Accepted: October 25, 2021

* Corresponding Author:
soyolerdene@seas.num.edu.mn

Publisher:
Taiwan Association for Aerosol
Research
ISSN: 1680-8584 print
ISSN: 2071-1409 online

© Copyright: The Author(s).
This is an open access article
distributed under the terms of the
Creative Commons Attribution
License (CC BY 4.0), which permits
unrestricted use, distribution, and
reproduction in any medium,
provided the original author and
source are cited.

Keywords: Air pollution, Literature overview, Ulaanbaatar, Mongolia, Further research recommendations

1 INTRODUCTION

Asian countries have experienced substantial growth in development and urbanization coupled with increases in energy use and transportation in recent decades (Moran and Kanemoto, 2016; Bilgili *et al.*, 2017; Li *et al.*, 2017). A considerable increase has occurred in the number and types of emission sources of air pollutants in Asia (Moran and Kanemoto, 2016; Li *et al.*, 2017). As a result, air pollution has emerged as a significant threat to the environment, quality of life, and health of the inhabitants in Asia, especially in developing countries where emission control system and strategies are not usually well established (Liu *et al.*, 2016; Moran and Kanemoto, 2016). Mongolia is one of the most rapidly developing countries in the world. As an East Asian country located between China and Russia, it is known for pristine environments with largely empty grassland, cold winters, and nomadic traditional culture. After the transition from a socialist system during the Soviet Union to democratic system in the beginning of the 1990s, urbanization, population growth, industrialization, and transportation development accelerated and created various environmental stresses in both urban and rural areas in the country (Warburton *et al.*, 2013; Pfeiffer *et al.*, 2015; Fan *et al.*, 2016; Batsaikhan *et al.*, 2018). Especially in recent years, Mongolia has become known for one of the world's worst air in the winter months (Davy *et al.*,



concentration and the chemistry (ions, metals, EC/OC) of the TSP, PM₁₀ and PM_{2.5} components, however, frequent updates are essential. It is already known that an increase in NO₂ is closely associated with an increase in the number of vehicles. Sulfur dioxide (SO₂) emission is mainly associated with coal combustion and partly with transport activities. Compared to a growing number of air quality studies in Ulaanbaatar, the air quality studies in other provinces are still limited. The findings on the urban air quality studies in Mongolia informs several directions for future research.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors appreciate two anonymous reviewers for their detailed and helpful comments on the manuscript. Financial support for this work was provided by the Asia-Pacific Network for Global Change Research (CRECS2020-01) and Science and Technology Foundation of Mongolia (RUS/2019/14).

REFERENCES

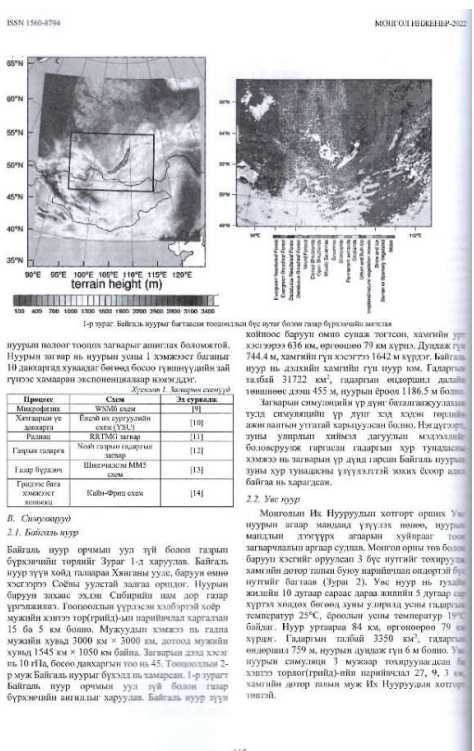
- Allen, R.W., Gombojav, E., Barkhasragchaa, B., Byambaa, T., Lkhasuren, O., Amram, O., Takara, T.K., Janes, C.R. (2013). An assessment of air pollution and its attributable mortality in Ulaanbaatar, Mongolia. *Air Qual. Atmos. Health* 6, 137–150. <https://doi.org/10.1007/s11869-011-0154-3>
- Amarsaikhan, D., Battsengel, V., Nergui, B., Ganzorig, M., Bolor, G. (2014). A study on air pollution in Ulaanbaatar city, Mongolia. *J. Geosci. Environ. Prot.* 2, 123–128. <https://doi.org/10.4236/gep.2014.22017>
- Amgalan, N., Narantsetseg, T., Shagjjamva, D. (2016). Valuations of elemental concentrations of particulate matter in Ulaanbaatar, Mongolia. *Open J. Air Pollut.* 5, 160–169. <https://doi.org/10.4236/ojap.2016.54012>
- Barabad, M.L.M., Jung, W., Versoza, M.E., Kim, M., Ko, S., Park, D., Lee, K. (2018). Emission characteristics of particulate matter, volatile organic compounds, and trace elements from the combustion of coals in Mongolia. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 15, 1706. <https://doi.org/10.3390/ijerph15081706>
- Bari, M.A., Baumbach, G., Kuch, B., Scheffknecht, G. (2010). Particle-phase concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons in ambient air of rural residential areas in southern Germany. *Air Qual. Atmos. Health* 3, 103–116. <https://doi.org/10.1007/s11869-009-0057-8>
- Batbold, C., Chonokhuu, S., Buuveijargal, K., Gankhuyag, K. (2021). Source apportionment and spatial distribution of heavy metals in atmospheric settled dust of Ulaanbaatar, Mongolia. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 28, 45474–45485. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13861-2>
- Batmunkh, T., Kim, Y.J., Jung, J.S., Park, K., Tumendemberel, B. (2013). Chemical characteristics of fine particulate matters measured during severe winter haze events in Ulaanbaatar, Mongolia. *J. Air Waste Manage. Assoc.* 63, 659–670. <https://doi.org/10.1080/10962247.2013.776997>
- Batsaikhan, N., Lee, J., Nemer, B., Woo, N. (2018). Water resources sustainability of Ulaanbaatar City, Mongolia. *Water* 10, 750. <https://doi.org/10.3390/w10060750>
- Baumbach, G., Vogt, U. (2003). Influence of inversion layers on the distribution of air pollutants in urban areas. *Water Air Soil Pollut.* 3, 65–76. <https://doi.org/10.1023/A:1026098305581>
- Bayasgalan, B., Matsumoto, T. (2017). Estimation and prediction of road traffic emissions in Ulaanbaatar. *J. JSCE* 73, 1_183–1_190. https://doi.org/10.2208/jscejer.73.1_183
- Bayasgalan, B., Matsumoto, T., Altangerel, O. (2018). On-board measurement and emission prediction from vehicle engines using ordinary fuel and fuel additives in Mongolia. *J. JSCE* 6, 118–126. https://doi.org/10.2208/journalofjsce.6.1_118
- Bilgili, F., Koçak, E., Bulut, Ü., Kuloğlu, A. (2017). The impact of urbanization on energy intensity: Panel data evidence considering cross-sectional dependence and heterogeneity. *Energy* 133, 242–256. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.121>
- Bolor-Erdene, D., Ganbaatar, D., Shagjjamba, D., Tugjsuren, N. (2011). The study on Ambient Air Quality in the some cities of Mongolia, Proceedings of 2011 6th International Forum on Strategic Technology. IEEEE, pp. 495–498.

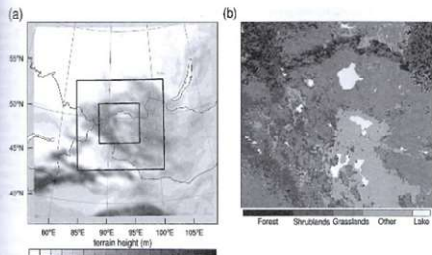
6. ШУТИС-ийн Эрдэм шинжилгээний бүтээлийн эмхэтгэлийн №22(2) 290 дугаарт Г.Гантуяа, Д.Ганбат, Н.А.Репина “Нуур-агаар мандлын харилцан үйлчлэлийн тоон загварчлал, симуляцийн зарим үр дүнгээс” өгүүллийг 111-117 хуудаст хэвлүүлж, “Монгол инженер-2022” эрдэм шинжилгээний хуралд илтгэл хэлэлцүүлсэн.



Table of contents for the journal issue, listing 31 articles with authors and page numbers. The last entry is '31. ТОМОР ЗАМЫН ЧИГЭЭСНИЙ ДАВХАРТ ХЭРЭГЛЭГДЭХ БУТАЛМАЛ ЧУЛУУЦ СУДАЛГАА' by D.ambaatar, N. Munkuzog, pages 164-168.

НУУР-АГААР МАНДЛЫН ХАРИЦАН ҮЙЛЧЛЭЛИЙН ТООН ЗАГВАРЧЛАЛ, СИМУЛЯЦИЙН ЗАРИМ ҮР ДҮНГЭЭС
Г.Гантуяа¹, Д.Ганбат², Н.А.Репина³
1 Монгол улс, Улаанбаатар, Монгол-Германи хамтарсан ашигт мэтэлик...
Холбоотой ажлынханы и-мэйл хаяг: ganbatd@rambler.ru



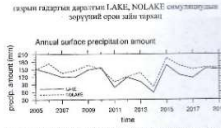


2-р зураг. (a) Тогоосхойн бүс нутгийн өргөлтийн босоо (b) 3-р мужийн газар ангилал, газрын бүтэц. (Цэвэр усны - нуур) байна (Зураг 4). Нуурын ногоолоор хур тунадасны өөрчлөлт зөвхөн нуурын мандалар хамаарагдахгүй, харин бүх бүс нутагт гарснаар байна. Нуурын түүн хэсэг боловч зарим газарт хур тунадас NOLAKE симуляцид хэргэжээ.

III. ҮР ДҮН
 Цаг агаарын үзүүлэлтүүдэд анхныгээр нууруудын өөрчлөлт илэрүүлэхэд түүх хоёр төрлийн тоон шаардлага, симуляци хийж гүйцэтгэв. Үүдс (1) Газар бүрхэвчийн хувьд оноогийн бодит байдалд шаардлага симуляци хийж LAKE гэж үзэв. (2) Нуурын гадаргыг ургамал бүрхэвчээр сольсон симуляци хийсэн нь NOLAKE гэж үзэв. LAKE, NOLAKE симуляцид үр дүнд харьцуулах агаарын параметрууд нуурын өөрчлөлт үзэхэд бага ба ихтүүр өргөлдөх нь бусад төрлийн газрын гадаргыг (хатуу, хөлд, ой, эрэнц шувуу, ургамал бүрхэвч зэрэг) агаар мандал, цаг агаарт үзүүлэх өөрчлөлтөд харьцуулахад хэрэгтэйгээр арга юм. LAKE, NOLAKE шаардлага, симуляцид тоон шаардлага параметрууд, газар бүрхэвчийн параметрууд бусад параметруудтай байж газарын төлөвөөр нь хоорондоо ялгаж болно.

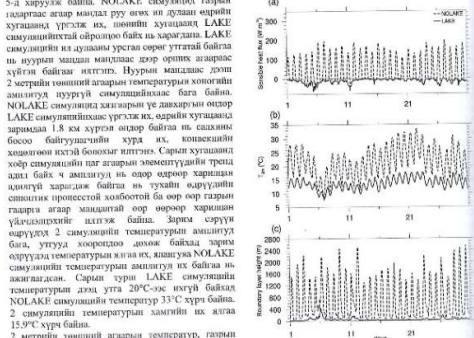


3-р зураг. 2 метрийн тэнгэрийн усны урвал, температур, өргөлтийн босоо хэмжээ, хөлдөх, хөлдөөх үеийн амьдрал.

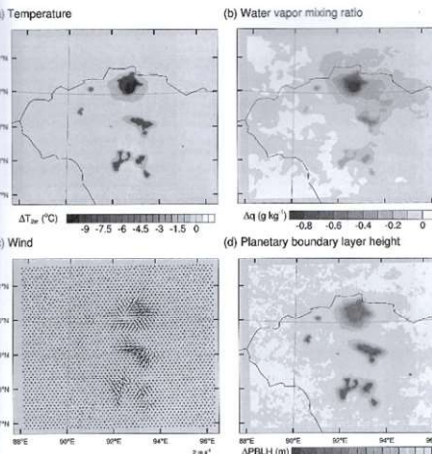


4-р зураг. LAKE (газар нутаг) өргөлтийн босоо (b) 3-р мужийн газар ангилал, газрын бүтэц. (Цэвэр усны - нуур) байна (Зураг 4). Нуурын ногоолоор хур тунадасны өөрчлөлт зөвхөн нуурын мандалар хамаарагдахгүй, харин бүх бүс нутагт гарснаар байна. Нуурын түүн хэсэг боловч зарим газарт хур тунадас NOLAKE симуляцид хэргэжээ.

3.2. Ус нуур
 LAKE, NOLAKE симуляцид үр дүнд харьцуулах агаарын параметрууд нуурын өөрчлөлт үзэхэд бага ба ихтүүр өргөлдөх нь бусад төрлийн газрын гадаргыг (хатуу, хөлд, ой, эрэнц шувуу, ургамал бүрхэвч зэрэг) агаар мандал, цаг агаарт үзүүлэх өөрчлөлтөд харьцуулахад хэрэгтэйгээр арга юм. LAKE, NOLAKE шаардлага, симуляцид тоон шаардлага параметрууд, газар бүрхэвчийн параметрууд бусад параметруудтай байж газарын төлөвөөр нь хоорондоо ялгаж болно.

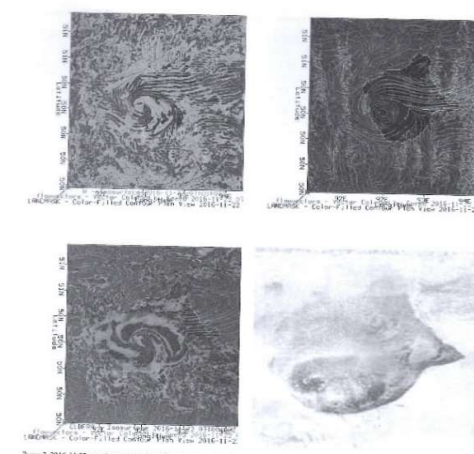


5-р зураг. LAKE, NOLAKE симуляцид үр дүнд харьцуулах агаарын параметрууд нуурын өөрчлөлт үзэхэд бага ба ихтүүр өргөлдөх нь бусад төрлийн газрын гадаргыг (хатуу, хөлд, ой, эрэнц шувуу, ургамал бүрхэвч зэрэг) агаар мандал, цаг агаарт үзүүлэх өөрчлөлтөд харьцуулахад хэрэгтэйгээр арга юм. LAKE, NOLAKE шаардлага, симуляцид тоон шаардлага параметрууд, газар бүрхэвчийн параметрууд бусад параметруудтай байж газарын төлөвөөр нь хоорондоо ялгаж болно.



6-р зураг. 2 метрийн тэнгэрийн усны урвал, температур, өргөлтийн босоо хэмжээ, хөлдөх, хөлдөөх үеийн амьдрал.

Нуурын мандал үүсэх агаарын кубарал судлахад тоон шаардлага, симуляци хийж гүйцэтгэв. Үүдс (1) Газар бүрхэвчийн хувьд оноогийн бодит байдалд шаардлага симуляци хийж LAKE гэж үзэв. (2) Нуурын гадаргыг ургамал бүрхэвчээр сольсон симуляци хийсэн нь NOLAKE гэж үзэв. LAKE, NOLAKE симуляцид үр дүнд харьцуулах агаарын параметрууд нуурын өөрчлөлт үзэхэд бага ба ихтүүр өргөлдөх нь бусад төрлийн газрын гадаргыг (хатуу, хөлд, ой, эрэнц шувуу, ургамал бүрхэвч зэрэг) агаар мандал, цаг агаарт үзүүлэх өөрчлөлтөд харьцуулахад хэрэгтэйгээр арга юм. LAKE, NOLAKE шаардлага, симуляцид тоон шаардлага параметрууд, газар бүрхэвчийн параметрууд бусад параметруудтай байж газарын төлөвөөр нь хоорондоо ялгаж болно.



7-р зураг. 2 метрийн тэнгэрийн усны урвал, температур, өргөлтийн босоо хэмжээ, хөлдөх, хөлдөөх үеийн амьдрал.

Температурыг бууруулж нуурын мандал дээрх үр дүнд харьцуулах агаарын параметрууд нуурын өөрчлөлт үзэхэд бага ба ихтүүр өргөлдөх нь бусад төрлийн газрын гадаргыг (хатуу, хөлд, ой, эрэнц шувуу, ургамал бүрхэвч зэрэг) агаар мандал, цаг агаарт үзүүлэх өөрчлөлтөд харьцуулахад хэрэгтэйгээр арга юм. LAKE, NOLAKE шаардлага, симуляцид тоон шаардлага параметрууд, газар бүрхэвчийн параметрууд бусад параметруудтай байж газарын төлөвөөр нь хоорондоо ялгаж болно.

7. Узбекистан улсын нийслэлт Ташкент хотод 2022 оны 10 сарын 24-26-нд зохион байгуулагдсан International Symposium on Computer Science, Computer Engineering and Education Technology-2022 (ISCSET-2022) симпозиумд оролцож “Results of simulations of atmosphere-lake interactions using numerical model” сэдвээр илтгэл танилцуулсан.



ISCSET 2022, 24 – 26 October, Tashkent, Uzbekistan

Acceptance Letter

Paper ID: **ISCSET 2022 - 17**

Paper: Results of simulations of atmosphere-lake interactions using numerical model

Dear Dr. Danaa Ganbat,

on conclusion of the review process, we are pleased to inform you that your paper above noted is **ACCEPTED** for **ORAL presentation** and **PUBLICATION** at International Symposium on Computer Science, Computer Engineering and Educational technology (ISCSET 2022) from 24th to 26th October, 2022 in Tashkent, Uzbekistan.

We sincerely welcome you to present your research in ISCSET 2022.

This year publication will be special issue of ESS online journal from our German partner university. Therefore, you need to submit your work via online tool to journal.

<https://www.bibliothek.tu-chemnitz.de/ojs/index.php/cs>

After registration to online journal, you can read all guidance how should submit your paper to publication. More sure case after that you should send .doc file to journal manager: utu@hrz.tu-chemnitz.de

Publication is free. Please do not hesitate to contact to organizers of ISCSET 2022 by sending to email: iriskulovaelmira@emuni.uz

Again congratulations on the acceptance of your paper. On behalf of the Program Committee, we look forward to your personal participation in the ISCSET 2022 in Tashkent.

Yours Sincerely,

Associate prof. Dr. Elmira Iriskulova

Behalf of Program Committee of

ISCSET 2022





ISCSET 2022, 24 – 26 October, Tashkent, Uzbekistan

Agenda

* Time is in Tashkent time. CEST (GMT +5)

Monday	24/10/2022 Chair : Prof. Dr. Munkhbold Badarch
10.00* – 10.30*	<i>Joining conference and peer networking</i>
10.30 – 10.35	Welcome Message Prof. Dr. Aslibek Gaybullaev <i>EMU University, Uzbekistan</i>
10.40 – 10.45	Greetings from TUC, Germany Prof. Dr. Dr. h. c. Wolfram Hardt <i>Chemnitz University of Technology, Germany</i>
10.50 – 10.55	Greetings from MUST, Mongolla Prof. Dr. Ganbat Danaa <i>Mongolian University of Science and Technology, Mongolia</i>
11.00 – 11.05	Greetings from NSTU, Russia Dr. Ivan Reva <i>Novosibirsk State Technical University, Russia</i>
11.10 – 11.15	Greetings from HUST, China Prof. Dr. Halbin Wu <i>Harbin University of Science and Technology, China</i>
11.20 – 11.25	Greetings from ENU, Kazakhstan Assoc. Prof. Dr. Zakirova Alma <i>L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazakhstan</i>
11.30 – 11.35	"Introduction to ISCSET history" Prof. Dr. Dr. h. c. Uranchimeg Tudevtagva <i>Chemnitz University of Technology, Germany</i>
11.40 – 11.45	"Introduction to EMU University" Elmira Iriskulova <i>EMU University, Uzbekistan</i>
Session 1: Computer Engineering. Chair: Prof. Dr. Dr. h. c. Uranchimeg Tudevtagva	
11.50 – 12.10	Invited Speech "A Novel Projection Distortion Correction Method on Patient's Body Surface" Kalyang Xu <i>Harbin University of Science and Technology, China</i>
12.10 – 12.30	"Tree Detection and Localization Approach for UAV-based Forest Inspection" Batbayar Battseren MSc. <i>Chemnitz University of Technology, Germany</i>
12.30 - 12.50	"Using Computer Engineering to Study Real Solutions of Scalarized Black Holes Abdirasulova" Mokhigul Abdirasulova <i>EMU University, Uzbekistan</i>

Seite 1 von 4



ISCSET 2022, 24 – 26 October, Tashkent, Uzbekistan

12.50 – 13.10	<p><i>"Solving Problems of Choosing Optimal Parameters and Balancing the Load of Virtual Subsystems IMS"</i> Nurmatova Sevara EMU University, Uzbekistan</p>
13.10 - 13.30	<p><i>"Temperature sensitivity test of FBG cascade microstructure fiber"</i> Chi Liu Harbin University of Science and Technology, China</p>
13.30 - 13.50	<p><i>Results of simulations of atmosphere-lake interactions using numerical model</i> Prof. Dr. Ganbat Danaa Mongolian University of Science and Technology, Mongolia</p>
14.10 - 15.30	Lunch
Session 2: Computer Science and Educational Technologies I. Chair: Prof. Dr. Zakirova Alma	
15.30 – 15.50	<p><i>"Importance of technology in teaching special terminology to medical students"</i> Sagatova Shakhnoza EMU University, Uzbekistan</p>
15.50 – 16.10	<p><i>"Platforms for improving student and participant engagement online"</i> Nizamova Khilola EMU University, Uzbekistan</p>
16.10 – 16.30	<p><i>"Implementation of Project-Based Learning for Freshmen in Online Learning During COVID-19 Pandemic"</i> Dr. Battulga Nasanjargal German-Mongolian Institute of Technology, Mongolia</p>
16.30 – 16.50	<p><i>"Analysis of success factors of E-Learning"</i> Sumjldmaa Tumurchudur Mongolian University of Science and Technology, Mongolia</p>
16.50 – 17.10	<p><i>"FPGA Based Speech Separation using IPD Features"</i> Andre Böhle, MSc. Chemnitz University of Technology, Germany</p>
17.10 – 17.30	<p>Invited Speech <i>"TUC DriveCloud - A cloud platform for recording and accessing test drive data"</i> Dipl. Inf. Rene Bergelt Chemnitz University of Technology, Germany</p>
17.30 – 18:00	<p>Steering committee meeting on Issues of 2023 <i>At least one responsible person from each Partner university should be on time to this meeting</i> TUC, MUST, NSTU, HUST, ENU, EMU</p>

Thursday	25/10/2022
Session 3: Computer Science and Educational Technologies II. Chair: Prof. Dr. Ganbat Danaa	



ISCSET 2022, 24 – 26 October, Tashkent, Uzbekistan

08.30* – 09.00*	<i>Joining conference and peer networking</i>
09.00 – 09.30	Invited Talk <i>"Application and Challenges for Realtime Audio Signal Processing"</i> Dipl. Inf. Rene Schmidt <i>Chemnitz University of Technology, Germany</i>
09.30 – 09.50	<i>"Design and implementation of intelligent vegetable recognition system based on deep learning"</i> Linlin Yang <i>Harbin University of Technology, China</i>
09.50 – 10.10	<i>Wifi based indoor localization using neural networks</i> Behzod Mukhiddinov <i>Webster University in Tashkent, Uzbekistan</i>
10.10 – 10.30	<i>"Ab initio study of the effect of Co, Ni doping on TbFe₂ compounds"</i> Yue Yuan <i>Harbin University of Science and Technology, China</i>
10.30 – 10.50	<i>"Evaluation of Data Serialization Formats for Reliable Data Sharing Mechanism"</i> Fatih Kilic, M.Sc <i>Chemnitz University of Technology, Germany</i>
10.50 – 11.10	<i>"Reimagining learning through digital transformation and partnership"</i> Munkhbold Badarch <i>Webster University in Tashkent, Uzbekistan</i>
11.10 – 11.30	<i>"The importance of using information technologies in the development of medical education"</i> Elmira Suyunova <i>EMU University, Uzbekistan</i>
11.30 – 11.50	<i>"Digital learning and transforming education"</i> Dr. Buyandelger Banzragch <i>Mongolian National Institute for Education Research, Mongolia</i>
11.50 – 12.10	<i>"The impact on learning motivation of spatial ability development learning model and interactive dynamic tools"</i> Suvd Erdenechimeg <i>Mongolian University of Science and Technology, Mongolia</i>
12.10 – 12.30	<i>"Study Results of the e-Learning Readiness of Mongolian Students"</i> Munkhbat Sharvanzams <i>Mongolian National Institute for Education Research, Mongolia</i>
12.30 – 12.50	<i>"Oxford University Press resources in science and education"</i> Marcin Dembowski <i>Oxford University Press, Poland</i>
12.50 – 14.20	Lunch
Session 4: Computer Science and Medical techniques. Chair: Elmira Iriskulova	
14.20 – 14.50	Invited Speech



ISCSET 2022, 24 – 26 October, Tashkent, Uzbekistan

	"Anti-cancer nanorobot controlled by AI method" Dr. Batgerel Tumurbaatar Mongolian University of Science and Technology, Mongolia
14.50 - 15.10	"The irrationality of digital medicine: AI / ML / DP / VR in practice" Inna Bondareva LLC, Moscow, Russia
15.10 – 15.30	"Application of micro structured fiber optic sensor in wide temperature detection field" Tianyu Yang Harbin University of Science and Technology, China
15.30 – 15.50	"User Interface Design of Humanoid Robot at Library: Case of Chemnitz University of Technology" Gantogoo Oyunbat B.Sc. Chemnitz University of Technology, Germany
15:50 – 16:10	"Current Situation and Prospects of Higher Education of Engineering and Technology in Mongolia" Nyamsuren Boloo Mongolian National Institute for Education Research, Mongolia
16:10 – 16:30	"Impact of talent management on employee's pay and compensations" Narantsatral Mongolian University of Science and Technology, Mongolia
16.50 - 17.10	Coffee Break
17:10 – 18:00	Discussion and Reflection on ISCSET 2022 – Munkhbold Badarch
18.00 – 20.00	Closing dinner of ISCSET 2022

Wednesday	26/10/2022
Session 4: Master class. Chair: Elmira Iriskulova Session only for local participants	
10.00 – 11.30	Lecture "Structure oriented evaluation model" Prof. Dr. Dr. h. c. Uranchimeg Tudevtagva Chemnitz University of Technology, Germany
11.30 – 12.00	Coffee break
12.00 – 13.30	Lecture Introduction about Tech4Com project Dipl. Inf. Rene Schmidt Chemnitz University of Technology, Germany
13.30 – 14.30	Discussion on future cooperation between TU Chemnitz and EMU



Results of Simulations of Atmosphere-lake Interactions Using Numerical Model

Ganbat Danaa

Open Education Center

Mongolian University of Science and Technology (MUST),
Ulaanbaatar, Mongolia

E-mail: ganbatda@must.edu.mn

Gantuya Ganbat

Faculty of Engineering

German-Mongolian Institute for Resources and Technology
(GMIT)

Nalaikh, Ulaanbaatar, Mongolia
E-mail: gantuvs@gmit.edu.mn

Abstract—Lakes influence the regional atmosphere through modifying thermodynamic characteristics. This study examines the effects of the Baikal lake on meteorological parameters in summertime using the numerical model. Diurnal variations in the lakes' impact on the atmosphere are found through changing the surface energy budget, which includes changes in sensible and latent heat fluxes. The changes in heat fluxes cause relatively lower surface temperature which leads to a shallow boundary layer over the lake surfaces. Greater heat capacity in water bodies compared to grasslands causes slower heating and cooling rates in the lakes. The amplitude of air temperature over the lake surfaces is smaller than that over the grasslands. Lakes promote diverging winds near the ground, furthermore, tend to stabilize the overlying atmosphere in the summertime.

Keywords—numerical simulation; lake-atmosphere; interaction;

I. INTRODUCTION

Numerical modeling approach is widely used to design and simulate in various fields including atmosphere and its underlying surface [1]. In some regions, the presence of lakes play important role in determining the regional climate. Interactions between the lake and atmosphere through exchanging heat, water vapor, and momentum fluxes [2] define the regional climate and weather. Atmospheric circulations in the surrounding region are affected by lakes through differences in thermal and frictional properties between lake and land surfaces [3].

Numerical studies examined lake-atmosphere interactions. the impacts of the Laurentian Great Lakes on regional climate studied by Notaro et al. [4] conducting numerical simulations with and without lakes. The results presented the decreased (increased) sea-level pressure in autumn-winter (summer), weakened cold-season cyclones and increased (decreased) turbulent fluxes during the cold (warm) season due to the presence of the lakes. the Weather Research and Forecasting (WRF) model used to investigate the effects of African Great Lakes on regional climate and revealed that the daytime

cooling by lakes modifies the dynamics and stability of the regional atmospheric condition [4].

Satellite data shows the reduced precipitation on and surrounding lakes (e.g., Baikal lake) in the summertime. Dynamic interactions between lakes and atmosphere should be conducted in order to explain the importance of the lakes in atmospheric circulations through assessing the changes in meteorological parameters. This study investigates the impacts of lakes in the summertime in the Baikal Lake region on some meteorological parameters.

II. METHODOLOGY

Simulations are conducted using the WRF model [5]. It is an open-source, atmospheric dynamical modeling system designed for both research and numerical prediction. Interactions of lake-atmosphere over the Baikal Lake region (Fig. 1) are investigated. The numerical simulations are set up with three domains. The initial and boundary conditions are taken from National Center for Environmental Prediction (NCEP) reanalysis data. The lake-atmosphere interactions and impacts of the lake on regional weather are tested comparing two simulations – the original case ("LAKE" experiment) and the case without lakes in the Baikal Lake region ("NOLAKE" experiment).

Spatial and temporal variations of various parameters are examined. Figure 2 shows the difference between the two simulations. This explores the horizontal impacts of lakes on some parameters.

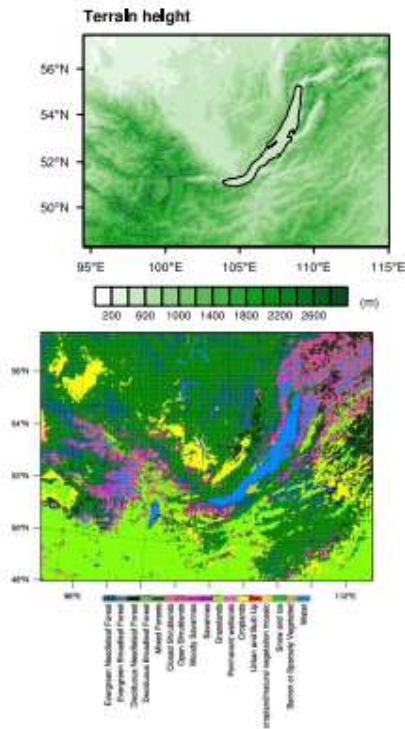


Figure 1. Terrain and land-use categories in the domain.

III. RESULTS

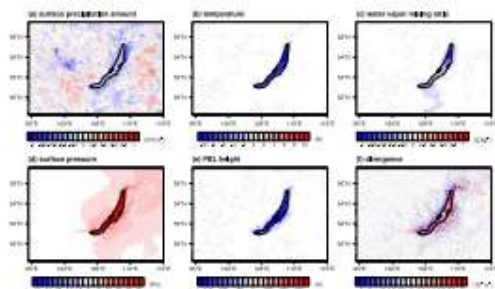


Figure 2. Difference between LAKE and NOLAKE simulations.

The lakes are significantly cooler and reduced water vapor mixing ratio over the lakes in the LAKE simulation is accompanied by suppressed evaporation from the cool water surfaces which is partly in agreement with the results by Notaro et al. [3]. The reduced precipitation and evaporation are caused by the Baikal Lakes in the summertime. Thinned boundary layer height over the lake is associated with reduced sensible heat flux, cooler air over the lakes. Temporal variations of impacts of lakes on some near-surface parameters are explored and will be presented in the presentation.

IV. CONCLUSIONS

Numerical simulations are conducted to examine the lake-atmosphere interactions. The domain area surrounding the Baikal lake was chosen and summertime case is examined. Two distinct cases with and without the lake were run to illustrate the impacts of lake on surrounding region.

ACKNOWLEDGMENT

This study supported by the Science and Technology Foundation, Mongolia (RUS/2019/14).

REFERENCES

- [1] Kourzeneva EV, Samuelsson P, Ganbat G, and D Mironov. "Implementation of lake model FLake in HIRLAM", HIRLAM newsletter, 2008.
- [2] Mukabana JR, Pielke RA. "Investigating the influence of synoptic scale winds and mesoscale circulations and diurnal weather patterns over Kenya using a mesoscale numerical model", Monthly Weather Review. 124, 224-243, 1996.
- [3] Notaro B, Holman K, Zarrin A., Fluck E., Vavrus S., Bennington V. "Influence of the Laurentian Great Lakes on regional climate". Journal of Climate. 26, 789-804, 2013.
- [4] Thiery W, Davin EL, Panitz HJ, Demuzere M, Lhermitte S, van Lipzig N. "Impacts of the African Great Lakes on the regional climate", Journal of Climate. 28, 4061-4085, 2015.
- [5] Skamarock WC, Klemp JB, Dudhia J, Gill DO, Liu Z, Berner J, et al. "A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4.3" (No. NCAR/TN-556+STR), 2021.

8. SCOPUS-т бүртгэлтэй “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса” сэтгүүлийн 2022 оны Т. 19. №4. дугаарын 306–317 хуудаст судалгааны үр дүнгээр бүрэн хэмжээний өгүүлэл хэвлүүлсэн.

<http://jr.rse.cosmos.ru/article.aspx?id=2556&lang=eng&fbclid=IwAR2HziouyXIOMDvgt-myJ2UVpQ7Rk6E3Myeyp8cNKC3sbTqjDptjG-VKSvw>

jr.rse.cosmos.ru/article.aspx?id=2556&lang=eng&fbclid=IwAR2HziouyXIOMDvgt-myJ2UVpQ7Rk6E3Myeyp8cNKC3sbTqjDptjG-VKSvw

YouTube Maps Gmail

ISSN 2070-7401 (Print), ISSN 2411-0280 (Online)

Space Research Institute
Russian Academy of Sciences

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

CURRENT PROBLEMS IN REMOTE SENSING OF THE EARTH FROM SPACE

Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Vol. 19. No. 4. pp. 306-317

Mesoscale vortex over Uvs-Nuur: analysis and numerical simulation

N.V. Vazaeva^{1,2}, I.A. Repina^{1,3}, A.A. Shestakova¹, G. Ganbat⁴

¹ A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia
² Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia
³ Research Computing Center of Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
⁴ German-Mongolian Institute for Resources and Technology, Ulaanbaatar, Mongolia

Accepted: 31.07.2022
 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-306-317

On the basis of satellite data and the results of a numerical simulation with the WRF-ARW model, cases of mesoscale circulation over Lake Uvs-Nuur, Mongolia, in November 2016 were analyzed. During this period of time, when the surface of the lake was not yet completely covered with ice, a stable mesoscale vortex was observed for several days – a clear evidence of the lake effect. Regardless of the initial data, the adapted model reproduced the time and location of the observed vortex with a good accuracy, correctly representing the structure of clouds and the time course of meteorological parameters near the surface, although it reproduced precipitation somewhat less accurately. Sensitivity experiments revealed the role of the warm lake surface and orography in the formation and enhancement of vortex. The orography near Uvs-Nuur is sufficient to create favorable conditions for local wind and breeze circulation, and it largely formed unstable temperature stratification due to partial blocking of the oncoming flow, playing a predominant role in the genesis of the vortex due to orographically induced convergence.

Keywords: mesoscale vortex, numerical simulation, WRF-ARW, Uvs-Nuur, helicity

Full text

References:

- References
- Verzetskaya P. S., Stepanenko V. M., Numerical simulation of the structure and evolution of a polar mesocyclone over the Kara Sea. Pt. 1. Model validation and estimation of instability mechanisms, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2016, Vol. 41, No. 6, pp. 425–434, DOI:10.3103/S1068373916060078.
- Repina I. A., Stepanenko V. M., Vazaeva N. V., Ganbat G., Mesoscale circulation in inner water body, *Fundamental'nye i prikladnye aspekty geologii, geofiziki i geoekologii s ispol'zovaniem sovremennykh informatsionnykh tekhnologii* (Fundamental and Applied Aspects of Geology, Geophysics and Geoecology Using Modern Information Technologies), Proc. 6th Intern. Scientific and Practical Conf., 2021, Vol. 2, pp. 75–80 (in Russian).
- Stepanenko V. M., Repina I. A., Ganbat G., Davaa G., Numerical simulation of ice cover of saline lakes, *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2019, Vol. 55, No. 1, pp. 129–138, DOI: 10.1134/S0001433819010092.
- Charney J. G., Eliassen A., On the growth of the hurricane depression, *J. Atmospheric Sciences*, 1964, Vol. 21, No. 1, pp. 68–75, DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1964\)021<0068:OTGOTH>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1964)021<0068:OTGOTH>2.0.CO;2).
- Emanuel K. A., Rotunno R., Polar lows as Arctic hurricanes, *Tellus*, 1989, Vol. 41A, pp. 1–17, DOI: <https://doi.org/10.3402/tellusa.v41i1.11817>.
- Forbes G. S., Merritt J. H., Mesoscale vortices over the Great Lakes in wintertime, *Monthly Weather Review*, 1984, Vol. 112, No. 2, pp. 377–381, DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1984\)112<0377:MVOTGL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1984)112<0377:MVOTGL>2.0.CO;2).
- Laird N. F., Observation of coexisting mesoscale lake-effect vortices over the western Great Lakes, *Monthly Weather Review*, 1999, Vol. 127, No. 6, pp. 1137–1141, DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1999\)127<1137:OOCMLE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1999)127<1137:OOCMLE>2.0.CO;2).
- Laird N. F., Krivostich D. A. R., Comparison of Observations with Idealized Model Results for a Method to Resolve Winter Lake-Effect Mesoscale Morphology, *Monthly Weather Review*, 2004, Vol. 132, No. 5, pp. 1093–1103, DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2004\)132<1093:COOWIM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2004)132<1093:COOWIM>2.0.CO;2).
- Saha S., Moorthi S., Wu X., Wang J., Nadiga S., Tripp P., Behringer D., Hou Y.-T., Chuang H., Iredell M., Ek M., Meng J., Yang R., Peña M., van den Doo H., Zhang Q., Wang W., Chen M., Becker E., *NCEP Climate Forecast System Version 2 (CFSv2) 6-hourly Products*, Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research Computational and Information Systems Laboratory, 2011, 61 p., DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00823.1.
- Shestakova A. A., Repina I. A., Mesoscale vortex over Lake Baikal: A case-study, *Russian J. Earth Sciences*, 2021, Vol. 21, Art. No. ES0001, 19 p., DOI: 10.2205/2021ES000763.
- Skamarock W. C., Klemp J. B., Dudhia J., Gill D. O., Liu Zh., Berner J., Wang W., Powers J. G., Duda M. G., Barker D., Huang X., *A description of the advanced research WRF model version 4*, Boulder, CO, USA: National Center for Atmospheric Research, 2019, 145 p., DOI: 10.5065/1dft-6p97.

Мезомасштабный вихрь над озером Убсу-Нур (Увс-Нуур): анализ и численное моделирование

Н. В. Вазаева^{1,2}, И. А. Решина^{1,3}, А. А. Шестакова¹, Г. Ганбат⁴

¹ *Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, Москва, 119017, Россия*
E-mail: vazaevanv@ifaran.ru

² *Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана*
Москва, 105005, Россия

³ *Научно-исследовательский вычислительный центр*
МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва, 119991, Россия

⁴ *Германо-монгольский институт ресурсов и технологий*
Улан-Батор, 15160, Монголия

На основе спутниковых данных и по результатам численного исследования на модели WRF-ARW проанализированы случаи мезомасштабной циркуляции над оз. Убсу-Нур (Увс-Нуур), Монголия, в ноябре 2016 г. В этот промежуток времени, когда поверхность озера ещё не полностью покрывалась льдом, несколько дней наблюдался устойчивый мезомасштабный вихрь — яркое проявление озёрного эффекта. Независимо от начальных данных адаптированная под описанный случай модель хорошо воспроизводила время и местоположение наблюдаемого вихря, правильно отображая структуру облаков и временной ход метеорологических параметров вблизи поверхности, хотя и несколько менее точно воспроизводила осадки. Эксперименты по чувствительности выявили роль тёплой поверхности озера и орораграфии в образовании и усилении вихрей. Орораграфия близ Убсу-Нур достаточна для создания благоприятных условий для местной ветровой и бризовой циркуляции, и она в значительной степени формировала неустойчивую температурную стратификацию за счёт частичного блокирования набегающего потока, играя преимущественную роль в формировании вихря за счёт орораграфически индуцированной конвергенции.

Ключевые слова: мезомасштабный вихрь, численное моделирование, WRF-ARW, Убсу-Нур, спиральность

Одобрена к печати: 31.07.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-306-317

Введение

Над свободными ото льда озёрами в холодное время года можно наблюдать мезомасштабные вихри — мезоциклоны. Исследование и анализ таких явлений чрезвычайно актуальны, поскольку они приводят к значительному увеличению интенсивности осадков, а также возможно появление других экстремальных погодных событий на побережье, как, например, было показано для американских Великих озёр в работе (Laird, Kristovich, 2004) или оз. Байкал в публикации (Shestakova, Repina, 2021).

Над крупными озёрами, которые в силу своих размеров и глубины не покрываются льдом в конце осени — начале зимы, вследствие озёрного эффекта формируются мезомасштабные (в зависимости от размера озера примерно от 10 до 100 км (Laird, 1999)) циркуляции. По механизму образования они схожи с таковыми для полярных мезоциклонов и тропических циклонов: потоки скрытого тепла за счёт конденсации в облаках (Вереземская, Степаненко, 2016; Charney, Eliassen, 1964) и поверхностный теплообмен за счёт турбулентных потоков тепла при увеличении скорости ветра в циклоне (Emanuel, Rotunno, 1989). Основную роль для вихрей над озером играют турбулентные тепловые потоки (Laird, 1999), образование обычно происходит при слабом ветре и слабом вертикальном сдвиге ветра (Forbes, Merritt, 1984), при возникновении в зимнее время глубокой конвекции. Подробно анализ основных источников завихренности для мезомасштабных вихрей над озером был проведён в работе (Shestakova,

Rerina, 2021). На примере оз. Байкал показано, что помимо перечисленных выше механизмов большое влияние в качестве инициирующего фактора имеет орография и местные ветры. Обнаруженные на космических снимках густые облачные скопления не были вызваны вынужденным крупномасштабным подъёмом воздуха на атмосферных фронтах или свободной конвекцией (как это обычно бывает летом в средних широтах). Была выявлена другая движущая сила для инициации конвекции — вертикальные движения в центре вихря из-за схождения масс. В свою очередь, первоначальная массовая конвергенция обеспечивалась не глубокой конвекцией над озером (например, за счёт выделения теплоты конденсации), поскольку глубокая конвекция была вторичной по отношению к вихрю, а орографией. Для подтверждения этой гипотезы были проведены численные эксперименты на модели без орографии, в которой мезоциклон отсутствовал. В настоящем исследовании такой эксперимент также будет проведён для оз. Убсу-Нур.

Солёное оз. Убсу-Нур находится на севере Монголии на границе с Российской Федерацией, в гористой местности и является крупным замерзающим мелководным водоёмом (площадь 3350 км²). Климат в бассейне озера резко-континентальный с малым годовым количеством осадков (143 мм) и выраженным годовым ходом температуры воздуха (средняя температура июля плюс 20 °С, января — минус 32 °С).

Метеорологические станции и посты в окрестностях озера практически отсутствуют — ближайшая метеорологическая станция Улангом расположена на расстоянии более 20 км. Обнаруженный нами по спутниковым данным мезомасштабный вихрь, ежегодно формирующийся над оз. Убсу-Нур в осенний период (Рерина и др., 2021, Степаненко и др., 2019), оказывает существенное влияние на формирование ледяного покрова и, вероятно, по аналогии с Великими Американскими озёрами (Forbes, Merritt, 1984), приносит экстремальные осадки, но найти даже географическое описание этого явления нам не удалось, при том что его повторяемость и локализация гораздо более явные, чем у подобных явлений на Американских озёрах. Недостаток информации об опасных последствиях этого события связан, прежде всего, с отсутствием поселений в регионе озера.

Одна из целей данной работы состоит в оценке качества моделирования озёрных циркуляций над оз. Убсу-Нур с использованием мезомасштабной модели и при разных начальных и граничных условиях, что позволит улучшить качество прогноза подобных явлений. Показано, что для прогноза возникновения и идентификации такого циклона удобно использовать спиральность восходящих движений (*angl. updraft helicity*). Мы применяли модель WRF-ARW (*angl. Weather Research and Forecasting – Advanced Research WRF*), хорошо зарекомендовавшую себя при прогнозировании подобных событий в других регионах. На примере одного случая проанализировано влияние орографии и температуры поверхности озера на механизмы образования мезоциклона над Убсу-Нуром. Чтобы дифференцировать влияние орографии и озёрного эффекта на формирование вихря, были проведены дополнительные эксперименты по чувствительности модели.

Данные и методы

В качестве основного источника данных об облачности для выявления мезомасштабной циркуляции над оз. Убсу-Нур использовались изображения спектрального радиометра MODIS (*angl. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) со спутников Terra, Aqua, а также со спутников Sentinel-2A, Landsat-8. Изображения доступны по ссылкам <https://worldview.earthdata.nasa.gov/> и <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>. Для численного моделирования мезомасштабных циркуляций была выбрана открытая исследовательская негидростатическая мезомасштабная атмосферная модель WRF-ARW (использовались версии 4.1.1. и 4.1.3.) (Skamarock et al., 2019).

Моделирование проводилось для периода с 19 декабря по 30 ноября 2016 г., когда по спутниковым снимкам была обнаружена мезомасштабная конвективная ячейка. Расчётные области (*рис. 1*, см. с. 308) с вложенными сетками (540×540 км с шагом 9 км, 219×219 км

с шагом 3 км, 151×151 км с шагом 1 км) имели 38 вертикальных уровней до высоты 16 000 м со сгущением в пограничном слое. В качестве начальных и граничных данных использованы поля реанализа CFSR (*англ.* Climate Forecast System Reanalysis) NCEP (*англ.* National Centers for Environmental Prediction (Национальный центр экологических прогнозов)) и поля реанализа ERA5. Для первой области использовалось спектральное смещение (*англ.* spectral nudging) под атмосферным пограничным слоем (АПС). В центре области расположено оз. Убсу-Нур — объект исследования. Включён дополнительный блок расчёта озёр. Для параметризации пограничного слоя применена схема Mellor-Yamada Nakanishi and Niino Level 2.5 PBL, для параметризации приземного слоя — схема Nakanishi and Niino PBL's surface layer scheme. RRTMG scheme (*англ.* Rapid Radiative Transfer Model for General, новая версия RRTM) и RRTMG short-wave выбраны для параметризации длинноволнового и коротковолнового излучения. Для параметризации облачности (внешняя область) выбрана схема Кайна — Фритца (*англ.* Kain-Fritsch scheme). Для параметризации турбулентности принята схема простой диффузии с использованием двухмерного метода (коэффициент K определяется только с использованием горизонтальной деформации). WRF Single-Moment 6-class scheme применена для параметризации микрофизики, Noah land-surface model — для параметризации параметров земной поверхности.

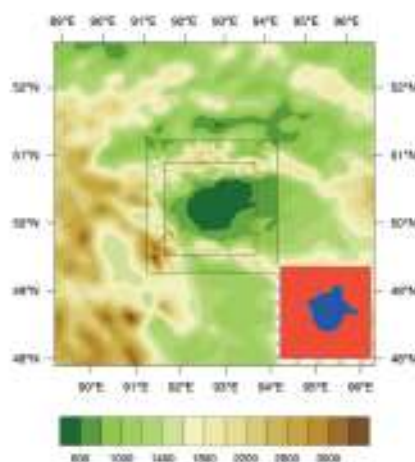


Рис. 1. Области моделирования, шаг сетки 9, 3, 1 км; цвет показывает высоту орографии (в метрах над уровнем моря). В правом нижнем углу изображена вложенная область моделирования с шагом 1 км с оз. Убсу-Нур — объектом исследования. Модель WRF-ARW, 19–30 ноября 2016 г.

Было проведено три численных эксперимента. В контрольном эксперименте (WRF-CFSv2) в качестве начальных и граничных условий использовался реанализ CFSv2 (*англ.* Climate Forecast System version 2) (Saha et al., 2011) с шагом по времени 6 ч. Второй эксперимент (названный WRF-ERA5) был проведён с реанализом ERA5 (Copernicus Climate Change Service (C3S), 2017, ERA5) с временным шагом 3 ч. Значения температуры поверхности озера в этих двух реанализах в рассматриваемом случае сильно различались: в ERA5 температура оказалась ниже, чем в CFSv2, почти на 10°C (рис. 2, см. с. 309). Таким образом, эти два эксперимента были направлены не только на выявление наилучшего источника исходных данных, но и в какой-то степени на демонстрацию роли тёплого озера (озёрного эффекта) в формировании обнаруженных мезомасштабных циркуляций.

Третий эксперимент (PLANE) отличался от WRF-ERA5 только тем, что высота орографии в обоих доменах была сильно сглажена до уровня моря. Сравнение экспериментов WRF-CFSv2, WRF-ERA5 и PLANE направлено на выявление роли орографии в формировании обнаруженных циркуляций.

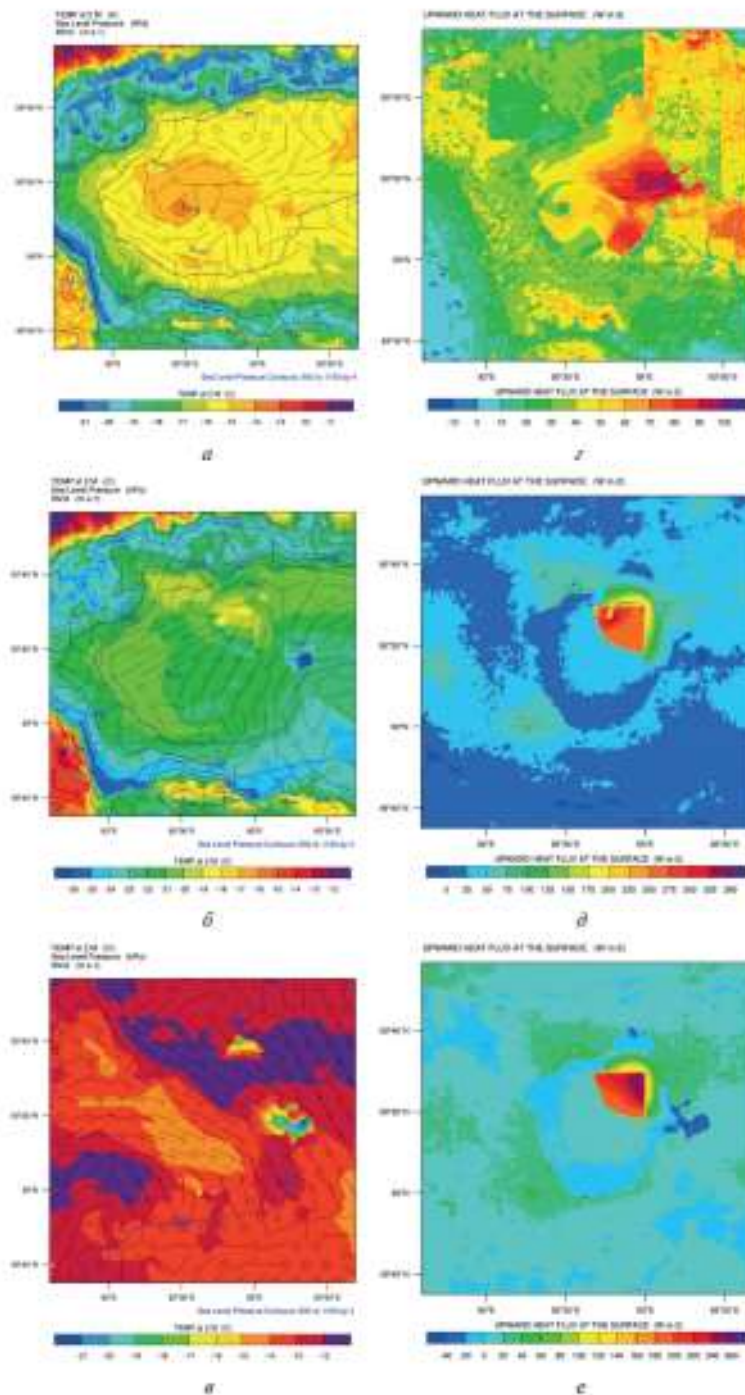


Рис. 2. Температура поверхности ($^{\circ}\text{C}$, цвет), давление на уровне моря (гПа, линии), ветер (м/с, векторы) (a–e), поток тепла с поверхности ($\text{В}/\text{м}^2$) (z–e) в 07:00 UTC (англ. Coordinated Universal Time, всемирное координированное время) 22 ноября 2016 г. из CFSv2 (a, c), ERA5 (б, d) и в эксперименте с отсутствием орографии (e, e). Шаг сетки — 1000 м. Модель WRF-ARW

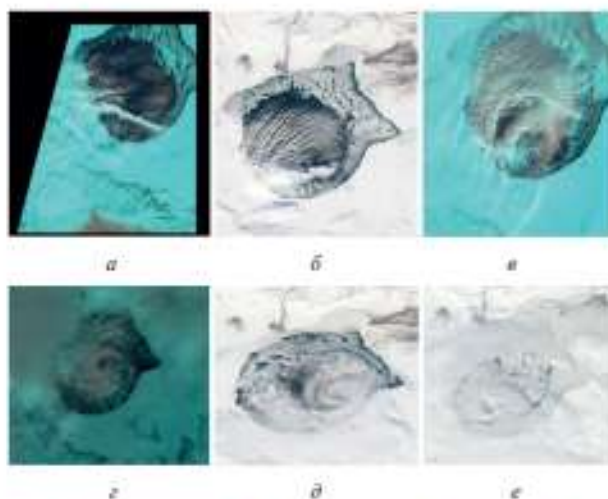


Рис. 3. Эволюция облачности над оз. Убсу-Нур: *а* — 19 ноября 2016 г., Sentinel-2A; *б* — 20 ноября 2016 г., MODIS; *в* — 22 ноября 2016 г., Sentinel-2A; *г* — 26 ноября 2016 г., Landsat-8; *д* — 28 ноября 2016 г., MODIS; *е* — 30 ноября 2016 г., MODIS

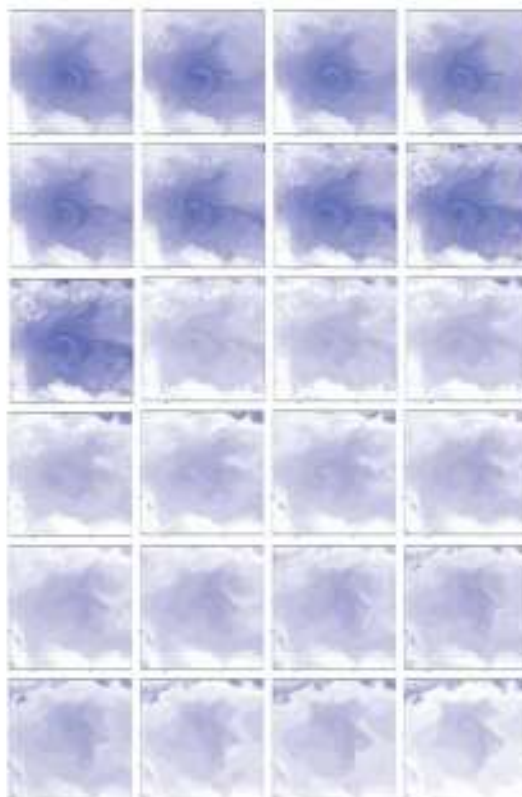


Рис. 4. Содержание водяного пара, вид сверху. Слева направо, сверху вниз — моменты времени 00:00–24:00 UTC, шаг — 1 час, 22 ноября 2016 г. Модель WRF 4.1.2. Шаг сетки — 1000 м. Реанализ CFSv2

На *рис. 3* (см. с. 310) показаны спутниковые снимки 19, 20, 22, 26, 28, 30 ноября 2016 г. На этих изображениях видна эволюция конвективной ячейки, которая перманентно в это время образовывалась на Убсу-Нуром. Эволюция вихря по результатам численного моделирования в контрольном эксперименте WRF-CFSv2 показана на *рис. 4* (см. с. 310) для 22 ноября 2016 г., где видна хорошая корреляция со спутниковым изображением. Ячейка над озером практически не двигалась, чему, предположительно, способствовала орография местности и округлая форма самого озера.

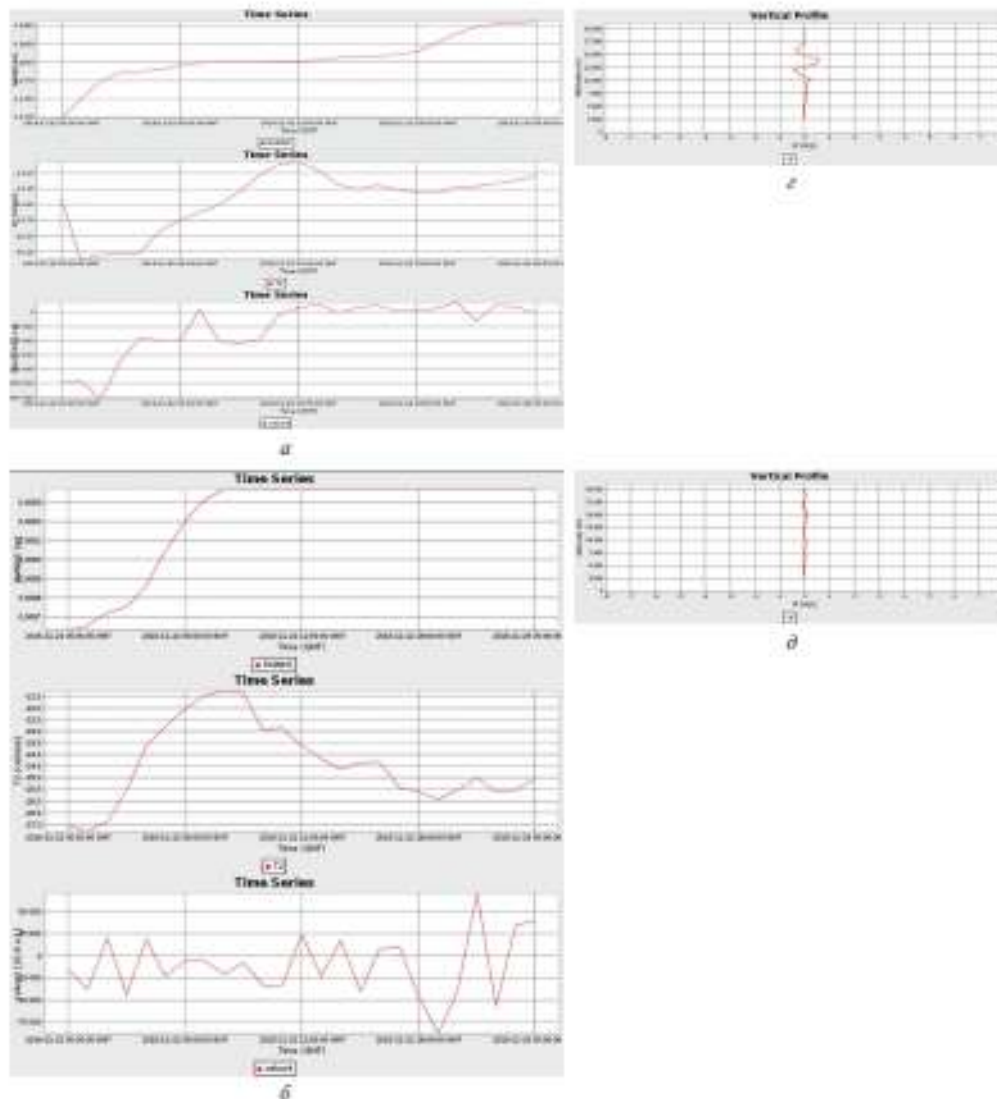


Рис. 5. Временные ряды (сверху вниз) суммарной интенсивности осадков, двухметровой температуры воздуха, относительной влажности (а–в); профили вертикальной скорости (с–е). Эксперименты WRF-CFSv2 (а, с), WRF-ERA5 (б, д), PLANE (а, е). 22 ноября 2016 г. Шаг сетки — 1000 м. Модель WRF-ARW (начало; окончание см. на с. 312)

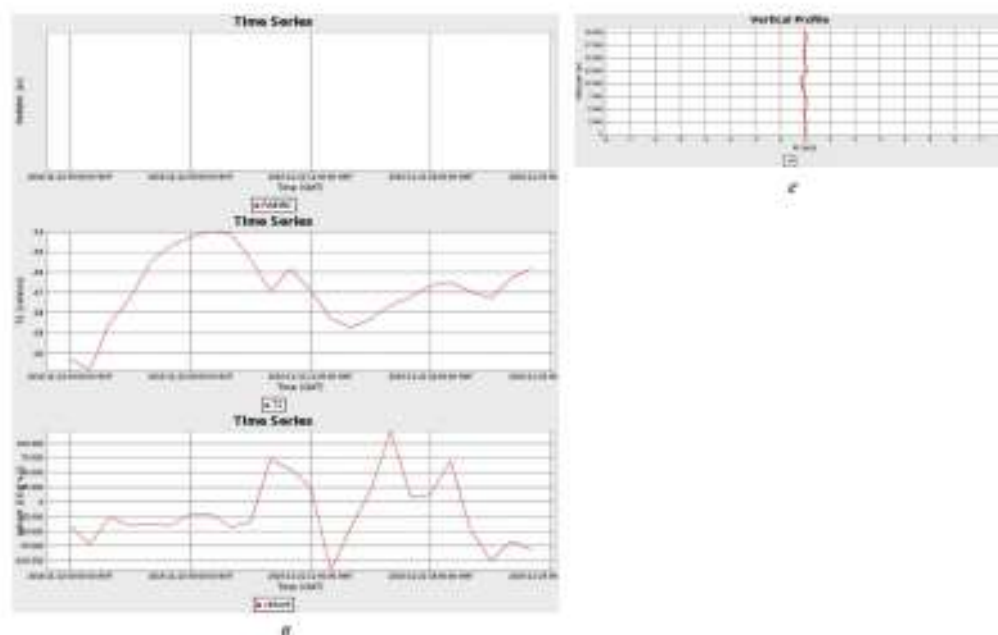


Рис. 5. Окончание (начало см. на с. 311)

Результаты моделирования. Динамика вихря в соответствии с данными наблюдений и результатами численных экспериментов на примере 22 ноября 2016 г.

Мезомасштабный вихрь, обнаруженный на спутниковом снимке 22 ноября, в контрольном эксперименте был полностью воспроизведён моделью, его положение близко к наблюдаемому (см. рис. 4). Вихревая облачная система имела форму «запятой» с сопутствующими ей днём «облачными улицами» у северного побережья, которые хорошо визуализируют действие часто возникающих на границе таких конвективных ячеек мезомасштабных когерентных структур, а в центре был виден «глаз» вихря. Выяснить время возникновения вихря по спутниковым наблюдениям с суточным временным разрешением затруднительно, поэтому анализ формирования мезомасштабной циркуляции и сопутствующих климатических явлений проведён по результатам численного моделирования. Именно мезомасштабный вихрь может объяснить снегопад от умеренного до сильного и кучево-дождевые облака, смоделированные в момент контрольного эксперимента WRF-CFSv2 (рис. 5, см. с. 311), поскольку в это время не было синоптических фронтов. По расчётам, суммарная интенсивность осадков в этом мезоциклоне достигала над озером 7 мм за 2 ч (см. рис. 5а).

Если обсуждать результаты моделирования экспериментов WRF-CFSv2 и WRF-ERA5 с использованием повторных анализов CFSv2 и ERA5 соответственно в качестве начальных и граничных условий для моделирования, то видно, что модель не воспроизводила мезоциклоны в их полном развитии в эксперименте WRF-ERA5: вихрь получался более слабым, предположительно вследствие меньшей температуры поверхности в эксперименте WRF-ERA5 (см. рис. 2), что в итоге повлияло на интенсивность вихря и осадков на побережье (см. рис. 5а, б для осадков, температуры и завихренности). Кроме того, отсутствует смещение вихря относительно результатов контрольного эксперимента WRF-CFSv2 и спутниковых изображений, что хорошо заметно на рис. 6 (см. с. 313) по полю скорости ветра.

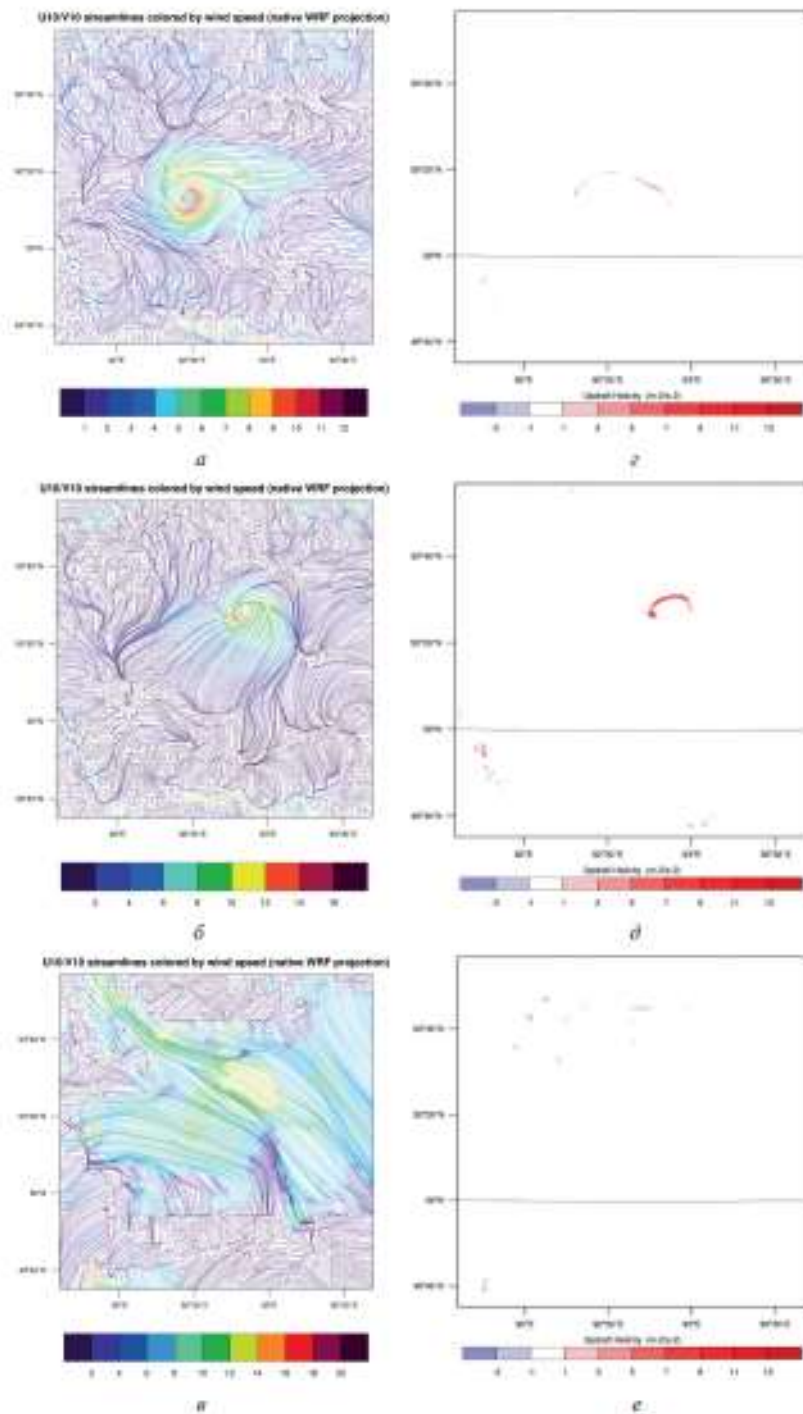


Рис. 6. Поле скорости ветра (a–c) и спиральность восходящих потоков (updraft helicity) (d–f) в экспериментах WRF-CFSv2 (a, d), WRF-ERA5 (b, e), PLANE (c, f). 22 ноября 2016 г., 07:00 UTC. Шаг сетки — 1000 м. Модель WRF-ARW

В то же время мезоциклон был воспроизведён в обоих случаях, тогда как для эксперимента с исключением орографии PLANE конвективную ячейку смоделировать не удалось, иногда лишь визуализировались слабые мезомасштабные приповерхностные вихри, едва проявляющиеся в полях облаков (здесь не показано), ветра (см. рис. 6), температуры (см. рис. 2). Осадков в этом случае не прогнозировалось (см. рис. 5e), тепловой поток в обоих случаях для данных ERA5 (эксперименты WRF-ERA5 и PLANE) в значительной степени был ниже потока с использованием данных CFSv2 (см. рис. 2), что привело к отсутствию систем глубокой конвекции вообще и мезоциклона в частности в эксперименте PLANE. Таким образом, преимущество использования данных CFSv2 в нашем случае не вызывает сомнений. Визуализировать и идентифицировать вихри удобно с помощью спиральности (см. рис. 6).

Моделирование выявило лишь небольшие значения доступной потенциальной энергии конвекции (англ. Convective Available Potential Energy — CAPE) (не показано) в эксперименте WRF-CFSv2 в течение всего эпизода. Так как атмосферные фронты находились далеко от озера, когда возникали вихри, то вместо вынужденного крупномасштабного подъёма воздуха на атмосферных фронтах или свободной конвекции движущей силой были вертикальные движения в центре вихря из-за схождения масс в результате орографии. Для подтверждения этой гипотезы был использован эксперимент PLANE без орографии, в котором мезоциклон отсутствовал.

Влияние орографии проявлялось, прежде всего, в конвергенции потоков над озером, что порождало начальную сдвиговую завихренность. Особенности орографии на севере и юге Убсу-Нура сформировали ветры в орографически образованном коридоре (см. рис. 6). Высокие горы почти полностью блокировали холодный воздух, идущий с запада. Южнее, где высота гор уменьшается, отмечались юго-западные ветры склонового ураганного типа. Когда имели место мезоциклоны, скорость набегающего потока была выше, чем в другие дни, и характер ветров в эти два дня был очень схож: на востоке озера — умеренно сильный южный ветер, тот же ветер — на юге озера и узкие струи щелевых ветров в сочетании с умеренным северным ветром — в северной части. Такое сочетание местных ветров, «стекающее» к озеру, привело к возникновению вихря при столкновении этих орографических потоков. Сильный ветер выступает неблагоприятным фактором (при прочих равных условиях) для образования озёрных вихрей, так как фоновые течения нарушают бризовую циркуляцию. Отношение скорости потока к пути, пройденному потоком над озером (к расстоянию от берега до места возникновения вихря), находилось в пределах диапазона, характерного для озёрных вихрей (Laird, Kristovich, 2004). Орография, соответственно, значительно модулировала поле ветра, что видно по профилю вертикальной скорости (см. рис. 5e, f).

Заключение

Настоящее исследование, насколько нам известно, впервые касается анализа и моделирования озёрной конвекции и связанных с ней мезомасштабных циркуляций и конвективной ячейки на оз. Убсу-Нур. Генезис, развитие и идентификация мезоциклона в ноябре 2016 г. рассмотрены преимущественно на основе численного моделирования с использованием модели WRF-ARW. Конвергенция течения под влиянием местных орографических особенностей приводит к возникновению вертикальных движений за счёт сходимости (по уравнению неразрывности). Орография — основной триггер для генерации мезоциклона, хотя именно озёрный эффект (потоки тепла и влаги со свободной ото льда поверхности озера) позволяет развиваться вихрю и связанным с ним конвективным облакам. Численные эксперименты показали, что при уменьшении потоков тепла формируется более слабый вихрь, при отсутствии орографии мезоциклон не воспроизводится.

Хотя мы изучили только один эпизод, он типичен для периода формирования ледяного покрова, который в случае Убсу-Нура приходится на ноябрь — декабрь. Развитие этого мезоциклона можно описать следующим образом. Орография вокруг озера создаёт конвергенцию потока над ним за счёт конвергенции орографических потоков, в результате над озером образуется область пониженного давления и восходящих движений. Таким образом, этот вихрь

возникает из-за горизонтального сдвига ветра, а интенсификация восходящих движений и вихре возможна из-за неустойчивой температурной стратификации, формирующейся в значительной степени под влиянием орографии, а также из-за турбулентного теплообмена с поверхностью озера в нижнем слое. Внутри вихря, где, по расчётам, суммарная интенсивность осадков превышает 7 мм/2 ч, рост глубокой конвекции обусловлен вынужденными восходящими движениями за счёт схождения потоков.

Из-за большой разницы температуры между незамерзающим озером и холодной сухой бризовой циркуляции, которая способствует развитию местных ветров. Сильный ветер разрушает бризовую циркуляцию, поэтому при нём вероятность возникновения конвективной ячейки значительно снижается, как это произошло в эксперименте с искусственно сниженной орографией. Наконец, мы хотели бы подчеркнуть практический вывод, сделанный из результатов настоящей работы, в контексте увеличения точности прогноза и скорости идентификации мезомасштабной циркуляции. Модель WRF-ARW может быть рекомендована для регионального прогноза мезомасштабных циркуляций над озёрами в горном рельефе, результаты контрольного эксперимента с достаточной степенью точности верифицированы по спутниковым изображениям. Ключевыми параметрами, ответственными за формирование вихря, представляются температура поверхности озера и рельеф местности.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 19-55-44028.

Литература

1. *Верезмская П. С., Степаненко В. М.* Численное моделирование структуры и эволюции полярного мезоциклона в Карском море. Ч. 1. Проверка модели и оценки механизмов неустойчивости // *Метеорология и гидрология*. 2016. № 6. С. 69–81. DOI: 10.3103/S1068373916060078.
2. *Репина И. А., Степаненко В. М., Вазюева Н. В., Ганбат Г.* Мезомасштабные циркуляции на внутренних водоемах // *Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий: материалы 6-й Международ. научно-практ. конф.* 2021. Т. 2. С. 75–80.
3. *Степаненко В. М., Репина И. А., Ганбат Г., Даван Г.* Моделирование ледового режима соленых озер // *Изв. Российской акад. наук. Физика атмосферы и океана*. 2019. Т. 55. № 1. С. 152–163. DOI: 10.31857/S0002-3515551152-163.
4. *Charney J. G., Eliassen A.* On the growth of the hurricane depression // *J. Atmospheric Sciences*. 1964. V. 21. No. 1. P. 68–75. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1964\)021<0068:OTGOTH>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1964)021<0068:OTGOTH>2.0.CO;2).
5. *Emanuel K. A., Rotunno R.* Polar lows as Arctic hurricanes // *Tellus*. 1989. V. 41A. P. 1–17. DOI: <https://doi.org/10.3402/tellusa.v41i1.11817>.
6. *Forbes G. S., Merritt J. H.* Mesoscale vortices over the Great Lakes in wintertime // *Monthly Weather Review*. 1984. V. 112. No. 2. P. 377–381. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1984\)112<0377:MVOTGL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1984)112<0377:MVOTGL>2.0.CO;2).
7. *Laird N. F.* Observation of coexisting mesoscale lake-effect vortices over the western Great Lakes // *Monthly Weather Review*. 1999. V. 127. No. 6. P. 1137–1141. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1999\)127<1137:OOCMLE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1999)127<1137:OOCMLE>2.0.CO;2).
8. *Laird N. F., Kristovich D. A. R.* Comparison of Observations with Idealized Model Results for a Method to Resolve Winter Lake-Effect Mesoscale Morphology // *Monthly Weather Review*. 2004. V. 132. No. 5. P. 1093–1103. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2004\)132<1093:COOWIM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2004)132<1093:COOWIM>2.0.CO;2).
9. *Saha S., Moorthi S., Wu X., Wang J., Nadiga S., Tripp P., Behringer D., Hou Y.-T., Chuang H., Iredell M., Ek M., Meng J., Yang R., Peña M., van den Dool H., Zhang Q., Wang W., Chen M., Becker E.* NCEP Climate Forecast System Version 2 (CFSv2) 6-hourly Products // *Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research Computational and Information Systems Laboratory*. 2011. 61 p. DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00823.1.
10. *Shetukova A. A., Repina I. A.* Mesoscale vortex over Lake Baikal: A case-study // *Russian J. Earth Sciences*. 2021. V. 21. Art. No. ES5001. 19 p. DOI: 10.2205/2021ES000763.
11. *Skamarock W. C., Klemp J. B., Dudhia J., Gill D. O., Liu Zh., Berner J., Wang W., Powers J. G., Duda M. G., Barker D., Huang X.* A description of the advanced research WRF model version 4. Boulder, CO, USA: National Center for Atmospheric Research, 2019. 145 p. DOI: 10.5065/1dth-6p97.

Mesoscale vortex over Uvs-Nuur: analysis and numerical simulation

N. V. Vazaeva^{1,2}, I. A. Repina^{1,3}, A. A. Shestakova¹, G. Ganbat⁴

¹ A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow 119017, Russia

E-mail: vazaevanv@ifaran.ru

² Bauman Moscow State Technical University, Moscow 105005, Russia

³ Research Computing Center of Lomonosov Moscow State University
Moscow 119991, Russia

⁴ German-Mongolian Institute for Resources and Technology
Ulaanbaatar 15160, Mongolia

On the basis of satellite data and the results of a numerical simulation with the WRF-ARW model, cases of mesoscale circulation over Lake Uvs-Nuur, Mongolia, in November 2016 were analyzed. During this period of time, when the surface of the lake was not yet completely covered with ice, a stable mesoscale vortex was observed for several days – a clear evidence of the lake effect. Regardless of the initial data, the adapted model reproduced the time and location of the observed vortex with a good accuracy, correctly representing the structure of clouds and the time course of meteorological parameters near the surface, although it reproduced precipitation somewhat less accurately. Sensitivity experiments revealed the role of the warm lake surface and orography in the formation and enhancement of vortex. The orography near Uvs-Nuur is sufficient to create favorable conditions for local wind and breeze circulation, and it largely formed unstable temperature stratification due to partial blocking of the oncoming flow, playing a predominant role in the genesis of the vortex due to orographically induced convergence.

Keywords: mesoscale vortex, numerical simulation, WRF-ARW, Uvs-Nuur, helicity

Accepted: 31.07.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-306-317

References

1. Verezhenskaya P. S., Stepanenko V. M., Numerical simulation of the structure and evolution of a polar mesocyclone over the Kara Sea. Pt. I. Model validation and estimation of instability mechanisms, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2016, Vol. 41, No. 6, pp. 425–434, DOI: 10.3103/S1068373916060078.
2. Repina I. A., Stepanenko V. M., Vazaeva N. V., Ganbat G., Mesoscale circulation in inner water body, *Fundamental'nye i prikladnye aspekty geologii, geofiziki i geokologii s ispol'zovaniem sovremennykh informatsionnykh tekhnologii* (Fundamental and Applied Aspects of Geology, Geophysics and Geoecology Using Modern Information Technologies), Proc. 6th Intern. Scientific and Practical Conf., 2021, Vol. 2, pp. 75–80 (in Russian).
3. Stepanenko V. M., Repina I. A., Ganbat G., Davaa G., Numerical simulation of ice cover of saline lakes, *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2019, Vol. 55, No. 1, pp. 129–138, DOI: 10.1134/S0001433819010092.
4. Charney J. G., Eliassen A., On the growth of the hurricane depression, *J. Atmospheric Sciences*, 1964, Vol. 21, No. 1, pp. 68–75, DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1964\)021<0068:OTGOTH>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1964)021<0068:OTGOTH>2.0.CO;2).
5. Emanuel K. A., Rotunno R., Polar lows as Arctic hurricanes, *Tellus*, 1989, Vol. 41A, pp. 1–17, DOI: <https://doi.org/10.3402/tellusa.v41i1.11817>.
6. Forbes G. S., Merritt J. H., Mesoscale vortices over the Great Lakes in wintertime, *Monthly Weather Review*, 1984, Vol. 112, No. 2, pp. 377–381, DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1984\)112<0377:MVO TGL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1984)112<0377:MVO TGL>2.0.CO;2).
7. Laird N. F., Observation of coexisting mesoscale lake-effect vortices over the western Great Lakes, *Monthly Weather Review*, 1999, Vol. 127, No. 6, pp. 1137–1141, DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1999\)127<1137:OOCMLE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1999)127<1137:OOCMLE>2.0.CO;2).
8. Laird N. F., Kristovich D. A. R., Comparison of Observations with Idealized Model Results for a Method to Resolve Winter Lake-Effect Mesoscale Morphology, *Monthly Weather Review*, 2004, Vol. 132, No. 5, pp. 1093–1103, DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2004\)132<1093:COOWIM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2004)132<1093:COOWIM>2.0.CO;2).
9. Saha S., Moorthi S., Wu X., Wang J., Nadiga S., Tripp P., Behringer D., Hou Y.-T., Chuang H., Iredell M., Ek M., Meng J., Yang R., Peña M., van den Doo H., Zhang Q., Wang W., Chen M., Becker E.,

NCEP Climate Forecast System Version 2 (CFSv2) 6-hourly Products, Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research Computational and Information Systems Laboratory, 2011, 61 p., DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00823.1.

10. Shestakova A. A., Repina I. A., Mesoscale vortex over Lake Baikal: A case-study, *Russian J. Earth Sciences*, 2021, Vol. 21, Art. No. ES5001, 19 p., DOI: 10.2205/2021ES000763.
11. Skamarock W. C., Klemp J. B., Dudhia J., Gill D. O., Liu Zh., Berner J., Wang W., Powers J. G., Duda M. G., Barker D., Huang X., *A description of the advanced research WRF model version 4*, Boulder, CO, USA: National Center for Atmospheric Research, 2019, 145 p., DOI: 10.5065/1dfh-6p97.

Ашигласан материал

- Степаненко, В. М., В. Н. Лыкосов, 2005: Численное моделирование процессов тепло-влажнопереноса в системе водоем – грунт. *Метеорология и гидрология*, 3, 95–104.
- Balsamo, G., Salgado, R., Dutra, E., Boussetta, S., Stockdale, T. and co-authors, 2012: On the contribution of lakes in predicting near-surface temperature in a global weather forecasting model. *Tellus. Dyn. Meteorol. Oceanogr.* 64, 15829.
- Gula, J. and W.R. Peltier, 2012: Dynamical Downscaling over the Great Lakes Basin of North America Using the WRF Regional Climate Model: The Impact of the Great Lakes System on Regional Greenhouse Warming. *Journal of Climate*, 25, 7723–77426
- Hodgkins, G.A., I.C. James II, and T.G. Huntington, 2002: Historical changes in lake iceout dates as indicators of climate change in New England, 1850–2000. *International Journal of Climatology*, 22:1819–1827.
- Hong SY, Noh Y, and Dudhia J, 2006: A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Monthly Weather Review* 134:2318–2341.
- Kain, J. S., 2004: The Kain-Fritsch convective parameterization: An update. *Journal of Applied Meteorology*, 43:2318–2341.
- Kalnay et al., 1996: The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American meteorological Society*, 77, 437–471.
- Kourzeneva, E. V., Samuelsson, P., Ganbat, G., & Mironov, D. 2008: Implementation of lake model FLake in HIRLAM. *HIRLAM Newsletter*, 54, 54–61.
- Lepparanta, M., 2010: Modelling the formation and decay of lake ice. *The impact of climate change on European lakes*, pp63-83.
- Long, Z., W. Perrie, J. Gyakum, D. Caya, and R. Laprise, 2007: Northern lake impacts on local seasonal climate. *Journal of Hydrometeorology*, 8(4), 881–896.
- Martynov, A., Sushama, L., Laprise, R., Winger, K. and Dugas, B., 2012: Interactive Lakes in the Canadian Regional Climate Model, version 5: the role of lakes in the regional climate of North America. *Tellus A*, 64, 16226.
- Mlawer, Eli. J., Steven. J. Taubman, Patrick. D. Brown, M. J. Iacono, and S. A. Clough (1997), Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research*, 102, 16663–16682.
- Notaro, M., A. Zarrin, S. Vavrus, and V. Bennington, 2013: Simulation of Heavy Lake-Effect Snowstorms across the Great Lakes Basin by RegCM4: Synoptic Climatology and Variability. *Monthly Weather Review*, 141, 1990–2014.
- Paul, M., 2012: Limnological aspects of the Uvs Nuur basin in northwest Mongolia. *PhD thesis, Technischen Universitaet Dresden.*

Perovich, D. K., 1996: The optical properties of sea ice. US Army Corps of Engineers.

Tewari, M., F. Chen, W. Wang, J. Dudhia, M. A. LeMone, K. Mitchell, M. Ek, G. Gayno, J. Wegiel, and R. H. Cuenca, 2004: Implementation and verification of the unified NOAA land surface model in the WRF model. 20th conference on weather analysis and forecasting/16th conference on numerical weather prediction, pp. 11–15.

Samuelsson, P., E. Kourzeneva, and D. Mironov, 2010: The impact of lakes on the European climate as simulated by a regional climate model. *Boreal Environment Research*, 15(2), 113–129.

Scott, R.W. and F.A. Huff, 1996: Impacts of the Great Lakes on regional climate conditions. *Journal of Great Lakes Research*, 22(4), 845–863.

Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X. Y. Huang, W. Wang, and J. G. Powers, 2008: A description of the advanced research WRF version 3. NCAR, Boulder.

Stepanenko, V., I. Mammarella, A. Ojala, H. Miettinen, V. Lykosov, and T. Vesala, 2016: LAKE 2.0: A model for temperature, methane, carbon dioxide and oxygen dynamics in lakes. *Geoscientific Model Development*, 9(5).

Stepanenko, V. M., E. E. Machul'skaya, M. V. Glagolev, and V. N. Lykosov, 2011: Numerical modeling of methane emissions from lakes in the permafrost zone. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 47(2), 252–264.

Thiery, W., E.L. Davin, H. Panitz, M. Demuzere, S. Lhermitte, and N. van Lipzig, 2015: The Impact of the African Great Lakes on the Regional Climate. *Journal of Climate*, 28, 4061–4085.

Verburg, P., and J.P. Antenucci, 2010: Persistent unstable atmospheric boundary layer enhances sensible and latent heat loss in a tropical great lake: Lake Tanganyika. *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*, 115(11), Article ID D11109.

Wen, L., Lv. Shihua, L. Zhaoguo, Zh. Lin, and N. Nagabhatla, 2015: Impacts of the two biggest lakes on local temperature and precipitation in the Yellow River Source region of the Tibetan Plateau. *Advances in Meteorology*. Article ID 248031.